



# Simulation des conditions de trafic intracellulaire d'un réseau sans fil en milieu industriel par un modèle de propagation composite

Walid Fahs

## ► To cite this version:

Walid Fahs. Simulation des conditions de trafic intracellulaire d'un réseau sans fil en milieu industriel par un modèle de propagation composite. Modélisation et simulation. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2008. Français. NNT : 2008CLF21874 . tel-00731049

**HAL Id: tel-00731049**

**<https://theses.hal.science/tel-00731049>**

Submitted on 24 Sep 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° D'ORDRE : D.U : 1874  
E D S P I C : 414

Année 2008

## **Université Blaise Pascal- Clermont II**

École Doctorale  
Sciences pour l'ingénieur de Clermont-Ferrand

### **Thèse**

Présentée par

**Walid Fahs**

Pour obtenir le grade de

**Docteur d'Université**

**Spécialité : Informatique**

**Diffusion d'informations partagées entre mobiles  
coopérants évoluant sous une même cellule d'un  
réseau sans fil avec infrastructure.**

Soutenue publiquement le 14 Novembre 2008 devant le jury :

Président :	M. SCHNEIDER M.	Professeur à l'Université Blaise Pascal
Rapporteurs :	Mme GAITI D.	Professeur à l'Université Technologie de Troyes
	M. VAL T.	Professeur à l'Université de Toulouse II
Directeur de thèse :	M. MISSON M.	Professeur à l'Université d'Auvergne
Co-directeurs :	M. BAKHACHE B.	Maître de Conférences à l'Université Libanaise
	Mme JACQUET F.	Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal



## **Remerciements**

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein de l'équipe Réseaux et Protocoles du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes de l'université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma gratitude à Monsieur Michel MISSON, Professeur à l'Université de Clermont I, pour avoir dirigé et encadré ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour ses conseils constants, ses encouragements et ses enseignements qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier ensuite, Monsieur Bacem BAKHACHE, Maître de Conférences à l'Université Libanaise et Madame Frédérique JACQUET Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal pour leur codirection de ma thèse et pour leurs conseils et leurs encouragements.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Thierry VAL, Professeur à l'Université Toulouse II, Madame Dominique GAITI, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, qui ont bien voulu porter un regard critique sur ma thèse et en être les rapporteurs.

Je tiens à remercier ensuite, Monsieur Michel SCHNEIDER, Professeur à l'Université Blaise Pascal, pour avoir accepté de présider à mon jury.

Mes remerciements s'étendent à toutes les personnes qui font ou ont fait partie de l'équipe "Réseaux & Protocoles" pour leur sympathie, leur aide et leurs encouragements. Je remercie en particulier Antonio FREITAS, Sabri BENFERHAT, Gérard CHALHOUB, Nassima HADID, Sébastien HERNANDEZ, Nader HAKIM, François DELOBEL, Marie-Françoise SERVAJEAN, Chakib BAOUCHE et Nancy RACHKIDY ainsi que Alexandre GUITTON pour sa grande disponibilité.

Pour finir, je remercie mes parents et toute ma famille pour leur soutien durant mes années d'études.



# **Table des matières**

Introduction .....	1
Chapitre 1 .....	5
Etat de l'art .....	5
Introduction .....	6
1.1- Applications industrielles et réseaux sans fil .....	6
1.1.1- Qu'est ce qu'une application industrielle ? .....	6
1.1.2- Les besoins des applications industrielles .....	6
1.1.3- Réseaux sans fil et réseaux filaires pour les applications industrielles .....	7
1.1.4- Historique des réseaux sans fil dans les industries .....	7
1.1.5- Les applications industrielles impliquant des mobiles .....	8
1.1.6- Exemple d'applications .....	10
1.1.7- Système temps réel .....	13
1.1.8- Spécificités des WLAN .....	14
1.1.9- Méthodes d'accès dans WLAN .....	19
1.1.10- Problème du terminal caché dans les WLAN .....	20
1.1.11- Différences entre réseaux locaux sans fil classiques et réseaux sans fil industriels .....	21
1.1.12- Conclusion de la première partie .....	22
1.2- Les réseaux locaux sans fil .....	22
1.2.1- Caractéristiques de 802.11 .....	22
1.2.2- HiperLAN .....	25
1.2.3- Les réseaux de type WPAN .....	25
Conclusion du chapitre 1 .....	30
Chapitre 2 .....	31
Problématique du sujet .....	31
Introduction .....	32
2.1- Les Principaux Modèles de Propagations .....	32
2.1.1- Intérêt de l'étude de la propagation des ondes radio .....	32
2.1.2- Les contraintes de la propagation radio .....	33
2.1.3- Le « Path loss » ou la dispersion de puissance .....	33
2.1.4- Les principaux types de modèles de propagation .....	33
2.2- Définition de l'effet capture .....	39
2.3- Identification des paramètres clés .....	39
2.3.1- Débit .....	40
2.3.2- Latence .....	40
2.3.3- Gigue .....	40
2.4- Différents Types d'Echanges .....	40
2.4.1 - Unicast .....	41
2.4.2- Multicast .....	41
2.4.3- Broadcast .....	42
2.4.4- Problème de broadcast et de multicast dans les réseaux sans fil avec infrastructure fixe .....	43
2.5- Méthodes d'accès .....	43
2.5.1- DCF ou Distributed Coordination Function .....	44
2.5.2- PCF ou Point Coordination Function .....	44
2.5.3- Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) .....	44
2.5.4- Mécanisme RTS/CTS .....	49
2.5.5- Evaluation de CSMA/CA .....	51
2.5.6- Evaluation de PCF .....	60
Conclusion du chapitre 2 .....	62

Chapitre 3 .....	63
Contribution aux échanges intracellulaires de type multicast .....	63
Introduction .....	64
3.1- Présentation de l'application générique WAVES et des objectifs de cette thèse .....	64
3.1.1- Présentation du domaine .....	64
3.1.2- Projet WAVES [Laf03] .....	65
3.2- Les objectifs de cette thèse .....	75
3.2.1- Démarche pour le choix d'un modèle de propagation en milieu industriel .....	75
3.2.2- Minimisation du temps de transmission d'un cycle .....	75
3.3- Stratégies d'échanges proposées .....	76
3.3.1- Méthode multiple unicast .....	77
3.3.2- Méthode Pseudo-PCF .....	80
3.3.3- Evaluation des deux méthodes proposées .....	84
3.4- Modification de l'Algorithme de Back-off standard (BEB) .....	87
3.5- Modèle de propagation choisi .....	89
3.6- Choix des paramètres du modèle ITU-1238-4 .....	92
3.6.1- choix de N (Coefficient d'atténuation) .....	92
3.6.2- Choix de l'écart type .....	92
Conclusion du chapitre 3 .....	93
Chapitre 4 .....	95
Evaluation par simulation et résultats obtenus .....	95
Introduction .....	96
4.1- Le simulateur utilisé .....	96
4.1.1- Choix du simulateur .....	96
4.1.2- Caractéristiques d'une entité communicante sous NS2 .....	98
4.2- Implémentation du modèle ITU1238 sous NS2 .....	99
4.3- Description des simulations réalisées .....	101
4.3.1- Démarche pour la validation du modèle de propagation .....	101
4.3.2- Simulation de la taille optimale de la cellule en utilisant le modèle ITU .....	106
4.3.3 - Simulation des méthodes d'échanges .....	108
4.3.4- Modélisation des méthodes de Back-off .....	121
Conclusion du chapitre 4 .....	127
Conclusion et perspectives .....	129
Bibliographie .....	135
Glossaire .....	143
Annexe A .....	147
Annexe B .....	151
Annexe C .....	171





# Introduction

La mobilité des entités communicantes, des communications caractérisées par un haut débit et des temps de transit courts font partie des besoins pour les applications industrielles.

Le besoin de mobilité conduit à utiliser une solution sans fil pour le domaine industriel, mais de telles solutions offrent des débits beaucoup moins élevés que les solutions filaires car dans ce type de communications, l'énergie porteuse d'information est diffusée et soumise aux perturbations du milieu.

En 2002, un projet industriel a été proposé à l'équipe Réseaux et Protocoles du Laboratoire LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) de l'Université Blaise Pascal. L'idée de départ du projet WAVES (Wi-Fi for Automatic guided vehicles) est le pilotage de mobiles coopérants guidés, à l'aide de solutions sans fil. La flotte de mobiles peut être constituée de chariots autonomes transportant des bagages dans un aéroport ou encore des marchandises dans un entrepôt. Chacun de ces mobiles peut être amené à coopérer avec ses voisins pour éviter les collisions par exemple, dans un tel cas il doit donc échanger avec les autres des informations de vitesse et de position. De telles applications sont qualifiées de critiques car les communications sont fortement contraintes par le temps.

L'objectif du projet est de proposer une solution de communication, qui respecte des contraintes temporelles fixées, et basée uniquement sur des réseaux locaux sans fil. Pour cela l'équipe Réseaux et Protocoles a rapidement opté pour une solution avec infrastructure (Bases fixes et Stations mobiles). Chaque station de base gère un certain nombre de mobiles qui lui sont affiliés et qui bougent uniquement dans une zone limitée appelée cellule. Les stations de base doivent permettre à des mobiles d'une même cellule ou de cellules différentes de se communiquer entre eux. Ces conditions ont conduit à choisir une solution et des produits conformes au standard 802.11 pour nos besoins de communication.

Les applications industrielles dans le projet WAVES nécessitent des échanges d'informations fréquents entre mobiles coopérants, ce qui impacte sur les besoins en débit mais aussi sur la latence associée à ces échanges : une information de position devient de plus en plus fautive ou caduque au cours du temps quand les mobiles se déplacent.

Dans ce contexte, l'usage du mécanisme de Back-off standard tel qu'il est prévu dans la norme 802.11 (BEB : Binary Exponential Back-off) cause des problèmes au niveau des délais de transmissions. Les études faites sur l'algorithme BEB indiquent clairement qu'il possède des performances non directement compatibles avec le trafic « temps réel » et cela conduit à augmenter le temps de cycle des échanges d'informations temps réel entre les mobiles évoluant sur un site industriel.

En plus, l'utilisation des méthodes d'échanges, entre les mobiles évoluant dans le site industriel, basées sur le broadcast conduit à utiliser les « beacons » DTIM (trames périodique de petite taille et contiennent des informations sur le point d'accès sont émise avant chaque diffusion « broadcast »). L'attente de ces « beacons » avant chaque diffusion induit un délai nécessaire et cela augmente le temps du cycle.

De même les méthodes qui se basent sur l'unicast classique se caractérisent par un grand nombre d'émissions de trames longues ce qui augmente aussi le temps du cycle.

L'objectif de notre travail est de chercher à minimiser le cycle des échanges d'informations temps réel entre les mobiles évoluant sur un site industriel couvert par un réseau Wi-Fi.

Pour cela nous avons travaillé sur plusieurs axes afin de :

1- Trouver la méthode d'échange optimale entre les mobiles : Dans cette partie nous avons évalué (par calcul et par simulation avec le simulateur NS2 (Network Simulator 2)) deux méthodes proposées :

- la méthode « multiple unicast », qui est très proche du principe du multicast classique mais qui n'a pas de contrainte par l'émission de « beacons » qui influe sur le délai de cycle de transmission entre les mobiles ;
- la méthode « Pseudo-PCF » qui est très proche de la méthode PCF décrite dans le standard 802.11 et qui s'appuie aussi sur la méthode DCF et sur l'algorithme de Back-off standard BEB (Binary Exponential Back-off).

2- Modifier l'algorithme de Back-off standard (BEB) : Pour éviter les problèmes provenant de l'utilisation de l'algorithme BEB dans les méthodes d'échanges proposées (multiple unicast et Pseudo-PCF) nous avons travaillé à modifier l'algorithme de Back-off standard pour minimiser le temps de cycle de transmission entre les entités communicantes.

Puisqu'il n'existe pas de modèle de propagation générique pour le domaine industriel et pour minimiser l'écart entre les résultats obtenus par simulation (sous NS2) les résultats de mesures réelles, nous avons dans un premier temps implémenté un modèle de propagation très proche des conditions de propagation du milieu industriel que nous avons choisi pour nos expérimentations.

Le premier chapitre de ce manuscrit présente l'état de l'art relatif aux applications industrielles communicantes, Pour lesquelles des entités éventuellement mobiles, telles que des robots, nécessitent l'usage de solutions sans fil pour communiquer entre elles et/ou avec leur environnement. Ce chapitre parle des applications industrielles et de leurs besoins, il précise les caractéristiques du réseau choisi dans cette étude.

Le deuxième chapitre décrit la problématique de notre sujet, il décrit premièrement les contraintes de la propagation radio et les principaux modèles de propagation existant, puis il présente les différents types d'échanges intracellulaires ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Pour atteindre nos objectifs, le chapitre 3 cherche à trouver les solutions pour minimiser le temps d'échanges entre les mobiles communicants dans un réseau de type 802.11 avec infrastructure. Premièrement, il décrit notre contribution dans le projet WAVES en précisant par quelles méthodes il est possible de minimiser le temps de cycle d'échanges entre les mobiles coopérant via un réseau sans fil de type 802.11. Pour cela plusieurs stratégies d'échanges qui se basent sur le multicast et/ou le broadcast (multiple unicast et Pseudo-PCF) sont comparées. Dans un deuxième temps une modification de l'algorithme de Back-off standard (BEB) est explicitée en vue d'obtenir des résultats plus performants dans le domaine applicatif qui nous intéresse.

Dans le chapitre 4 sont décrits les modèles de simulation des conditions de propagation en milieu industriel et des méthodes (échanges et Back-off) présentés dans le chapitre 3. Ensuite les résultats obtenus par ces simulations sont discutés en évaluant des performances des solutions proposées. Et enfin nous terminons par la conclusion et les perspectives de ce travail.

# Chapitre 1

## **État de l'art**

## **Introduction**

Ce chapitre présente l'état de l'art correspondant à ce travail de thèse qui concerne les applications industrielles communicantes, pour lesquelles des entités éventuellement mobiles nécessitent l'usage de solutions sans fil pour communiquer. Ce chapitre est composé de deux parties :

- la première partie définit de telles applications industrielles ainsi que leurs besoins. Elle présente ensuite les types de réseaux à utiliser pour faciliter les communications entre les différentes entités existantes de ces applications ;
- la deuxième partie présente les caractéristiques des réseaux de type WLAN (Wireless Local Area Network) et de type WPAN (Wireless Personal Area Network).

### **1.1- Applications industrielles et réseaux sans fil**

#### **1.1.1- Qu'est ce qu'une application industrielle ?**

Donner les contours du domaine désigné par « application industrielle » n'est pas une chose simple car le domaine est très vaste. Dans [Mar02], P.S. Marshall définit ce domaine par : « une invention qui peut être faite ou employée dans un certain type d'industries ». Dans notre approche nous allons nous consacrer à des applications industrielles caractérisées par certaines contraintes ou besoins spécifiques définis ci-après.

#### **1.1.2- Les besoins des applications industrielles**

Pour réaliser correctement une tâche impliquant plusieurs entités communicantes dans une industrie, certains besoins ou contraintes sont prendre en compte:

- 1- Mobilité : la mobilité est un critère très important dans l'industrie, car de nombreuses applications utilisent des mobiles ou des robots qui ont besoin de communiquer entre eux [Cirr02] [Pey04].
- 2- Contraintes d'alimentation : la liberté de déplacement garantie par la technologie sans fil se voit quelque peu entravée par la nécessité d'alimenter les entités communicantes, c'est-à-dire de les connecter à une source électrique. Une solution consiste à leur garantir une certaine autonomie énergétique.
- 3- Sécurité : il existe toujours la possibilité qu'un « pirate » veuille s'approprier ou polluer des informations critiques. Pour cela nous avons besoin d'un moyen de sécurité et de confidentialité pour protéger les applications [Bbe07] [Car06].
- 4- Robustesse : dans une industrie, la robustesse des applications et indirectement de leur système de communication est l'un des critères les plus importants (la finalité étant le

plus souvent de produire un produit manufacturé). Il faut donc que le système de production en question soit capable de fonctionner avec une grande disponibilité et un taux moyen de pannes faible ou un temps moyen entre pannes : MTBF (Mean Time Between Failures) élevé.

### **1.1.3- Réseaux sans fil et réseaux filaires pour les applications industrielles**

S'il s'agit de faire communiquer les entités coopérantes d'une application industrielle trois solutions viennent à l'esprit :

- via un réseau exclusivement filaire ;
- via un réseau exclusivement sans fil ;
- via un réseau mixte (filaire et sans fil).

Les caractéristiques de l'application (mobilité, sécurité, robustesse,...) vont nous orienter vers l'une ou l'autre de ces solutions. Le plus souvent, s'il existe un véritable besoin de mobilité, une solution exclusivement câblée introduit généralement trop de contraintes au niveau des déplacements [McC06]. Il persiste malgré tout des applications pour lesquelles des entités mobiles sont reliées à d'autres par un cordon ombilical quand le médium sans fil ne permet pas de porter les débits nécessaires (pour des applications d'explorations sous-marines par exemple).

Il faut aussi garder en tête la possibilité de proposer une solution composite organisée autour d'une infrastructure câblée fédérant des points d'accès au réseau qui seront les interfaces entre les liens sans fil de leur cellule et les liens filaires de l'infrastructure. Cette solution correspond au mode réseau sans fil avec infrastructure qui sera présenté en 1.1.8.3.

L'émergence des solutions sans fil est due :

- d'une part à « la mise à disposition d'un médium » par la libération de nombreuses fréquences ISM (Instrumentation Scientifique et Médical) et l'augmentation des puissances d'émission autorisées,
- et d'autre part à l'avènement de standards tels que Wi-Fi, Bluetooth et maintenant ZigBee [Val94][Her03][Lla06].

### **1.1.4- Historique des réseaux sans fil dans les industries**

A l'origine des réseaux locaux sans fil WLAN, les applications visées étaient plutôt pointues [Pey04][Mar03]. Le plus souvent, les technologies de communication proposées n'étaient pas encore conformes à un standard et il existait des restrictions en termes de puissance d'émission et de fréquences utilisables. A la naissance du standard de réseaux sans fil 802.11 qui évolua ensuite en « Wi-Fi » (pour Wireless Fidelity), les WLAN ont pris progressivement



leur place dans les industries pour des développements faits pour la bureautique (les PC, des ordinateurs portables, en remplacement d'Ethernet par exemple), ou de façon plus marginale pour connecter des périphériques évolués comme des caméras de vision industrielles utilisées pour des techniques de contrôle non destructif [Cir02].

Le standard 802.11 a été l'élément catalyseur qui a mis fin à une partie des craintes associées aux solutions radio propriétaires qui sont elles restées limitées pour les applications industrielles.

La présence des réseaux Wi-Fi puis des solutions conformes au standard Bluetooth ont constitué un support pour des prolongements dans le monde industriel.

Avec Wi-Fi et Bluetooth, nous rentrons dans un univers standardisé, avec une offre en développement rapide, des coûts peu élevés et des conditions de mise en œuvre relativement simples. Du coup, ces réseaux intéressent de multiples applications, où ils pourront remplacer des liaisons filaires classiques, par exemple dans les cas où il n'est pas facile de faire passer des câbles ou lorsque les équipements doivent être déplacés souvent, obligeant à refaire régulièrement le câblage.

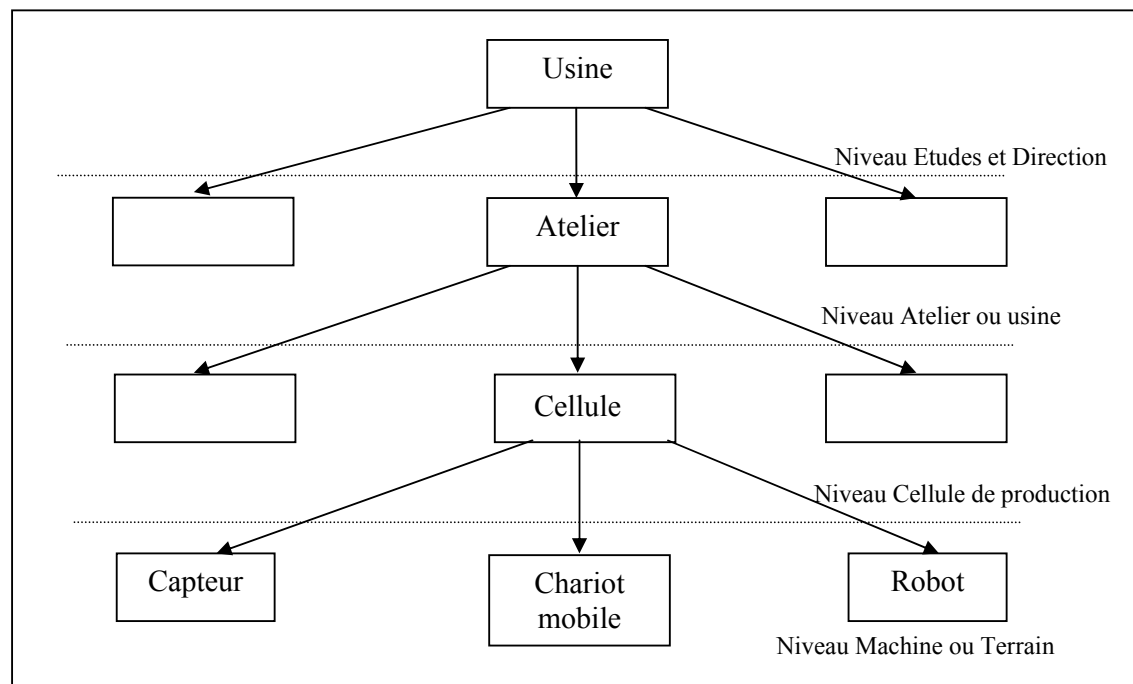
De plus, ces avancées technologiques ont donné une assez bonne image de l'utilisation des standards sans fil dans les industries et elles ont éliminé la mauvaise expérience résultant de l'usage des téléphones mobiles GSM [Cirr02].

Avec Wi-Fi et/ou Bluetooth, il y a beaucoup moins de risques que les choses se passent comme avec le GSM. Tout d'abord, il s'agit de transmettre des informations essentiellement numériques et il existe des techniques de codage de l'information et des protocoles bien éprouvés qui permettent de s'assurer de l'intégrité des données transmises dans un WLAN. Ensuite, les équipements à connecter (des équipements industriels) ne sont pas aussi mobiles que peut l'être un téléphone GSM dont les performances à ce niveau ne sont pas requises. De plus, au niveau de l'installation, il est relativement facile de trouver une configuration qui va assurer une bonne qualité de transmission.

### **1.1.5- Les applications industrielles impliquant des mobiles**

Dans le milieu industriel, représenté principalement par les sites de production (usines, ateliers), les applications informatiques permettent de superviser les unités de production (contrôle de commande des machines, surveillance et suivi des procédés de fabrication, etc.) et doivent pour cela partager des ressources parfois coûteuses comme des calculateurs spécialisés ou des bases de données complexes [Lep91].

Les communications nécessaires aux applications industrielles peuvent être analysées selon une classification par niveaux. En général, au moins quatre niveaux sont retenus si l'on reste dans le cadre de communications locales (Figure I.1) [Lep91]. Le niveau le plus bas est appelé niveau machine ou terrain. La communication se fait ici entre des capteurs et actionneurs intelligents ou des systèmes de commande simples. La taille des messages est faible et le flux d'informations est souvent périodique, notamment compte tenu de la nécessité de scruter les capteurs régulièrement. La communication est, la plupart du temps, réalisée par des réseaux de terrain tels que CAN, INTERBUS, etc. [Hop03].



**Figure I. 1: Niveaux de classification des besoins en communication.**

Le niveau suivant est le niveau cellule de production. Les entités communicantes sont un ensemble de systèmes programmables, comme des équipements à commandes numériques ou des automates qui, typiquement, peuvent partager une même base de données et sont souvent pilotés par un système de commandes global. Les données échangées sont ici des fichiers de taille importante (programmes à exécuter, caractéristiques des outils) ou des messages de commande courts.

Le niveau supérieur est le niveau usine ou atelier où la communication a lieu entre les différentes cellules de production formant un atelier ou une usine. Les dialogues sont variés : échanges de fichiers de programmes pour les cellules, ordres de lancement de production, états des équipements pour le suivi de production. Le volume d'informations peut être très important et différents types peuvent cohabiter (données, images, vidéo).

Le niveau le plus haut est le niveau études et direction, la communication ayant lieu entre les différents services d'une entreprise. Les échanges sont de type bureautique classique avec transfert de données de gestion concernant les clients, les commandes, etc. Ils peuvent donc générer des trafics importants.

Certaines de ces applications industrielles nécessitent des entités mobiles (chariots ou robots mobiles, terminaux de saisie) comme c'est le cas, par exemple, pour l'automatisation du transport de charges [Val94] [Laf03]. Dans ce cas, nous allons nous intéresser principalement aux niveaux machine et surtout cellule de production. La nature des échanges est sensiblement la même en rajoutant toutefois éventuellement les commandes spécifiques permettant de faire déplacer ou de localiser les mobiles. Le dispositif de guidage de ces mobiles a été aussi utilisé pour les échanges d'informations avec eux. C'est le cas pour la communication de certaines applications dites « filo-guidées » qui utilisent une infrastructure filaire souvent complexe, installée la plupart du temps dans le sol et reliée aux différents équipements qu'il faut guider ou superviser. Le fil de guidage peut aussi servir d'antenne pour une communication radio. Ces types de solutions présentent des inconvénients majeurs, notamment au niveau des coûts, que ce soit pour l'installation des câbles ou pour la modification des trajectoires suivies par les mobiles. Ils limitent de plus les débits de transmission lorsque plusieurs mobiles se trouvent dans la même zone et utilisent les mêmes ressources, notamment la même antenne matérialisée par la même portion du fil de guidage.

Il existe d'autres solutions moins coûteuses et offrant plus de mobilité et de maniabilité comme les solutions exploitant les technologies sans fil [Lla06], telles que Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee ou les transmissions infrarouge, etc.

### **1.1.6- Exemple d'applications**

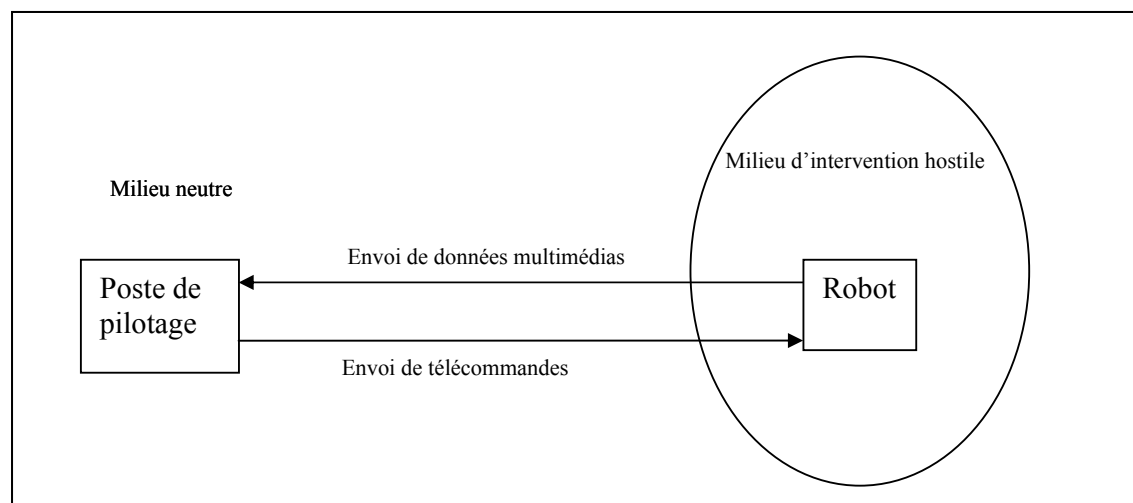
#### **1.1.6.1- Les applications critiques**

L'évolution des procédés industriels et le développement des interventions d'équipements mobiles sur des zones particulières, par exemple en milieu hostile (centrales nucléaires, centre de stockage de déchets, fonds sous marins, etc.), ont fait apparaître un nouveau type d'applications, dites applications critiques. Celles-ci sont caractérisées par l'existence d'un site d'intervention plus ou moins hostile à la présence humaine. Il en résulte généralement l'exploitation d'un outil d'intervention piloté à distance à partir d'un site neutre. Ce type de solution est souvent qualifié de « téléopéré ». Une telle solution est caractérisée par la mobilité de l'outil et la qualité de service des communications pouvant être acheminées du poste de pilotage au site d'intervention et vice versa [Jac00].

Les moyens de communication doivent permettre désormais de suivre les équipements mobiles dans des trajectoires éventuellement complexes, souvent non prévues à l'avance et irrégulières, quand il s'agit par exemple de contourner des obstacles ou de se déplacer dans des zones de terrains accidentés. Ces équipements doivent être pilotés à distance pour permettre des interventions sur des sites hostiles comme pour la manipulation de produits dangereux, pour des décontaminations chimiques ou nucléaires, etc. Ce mode de pilotage est appelé téléopération, il garantit la sécurité des opérateurs en les éloignant de la zone dangereuse mais nécessite l'envoi de quantités d'informations importantes, souvent de type multimédia, afin de permettre la prise de décision au niveau de l'opérateur (Figure I.2).

Ces échanges d'informations sont caractérisés par leur dissymétrie. En effet, le poste de pilotage ne transmet que de petites quantités d'informations (essentiellement de type contrôle/commande) qui peuvent être espacées dans le temps, le mobile pouvant être immobilisé momentanément. A contrario, le mobile est chargé de transmettre des informations cruciales et volumineuses comportant des images, du son, des télémessures, etc. Au niveau énergétique, le mobile est pénalisé car il ne dispose pas de sources d'énergie permanentes mais seulement de batterie d'accumulateurs dont la puissance et la durée de vie sont limitées.

Du fait de ces importants besoins en communication, la plupart de ces applications restaient jusqu'à peu de temps encore basées sur des solutions utilisant un médium en fibre optique souple. Elles doivent désormais évoluer vers le sans fil pour des raisons de limitation des coûts d'installation, d'augmentation de la rapidité de mise en œuvre, d'amélioration de la mobilité, d'allongement du rayon d'action et de la maniabilité.



**Figure I. 2: Système de téléopération.**

### 1.1.6.2- Cas d'applications critiques

Les principales applications critiques se rencontrent dans le domaine nucléaire ou sous-marin.

#### a- Cas générique en milieu nucléaire

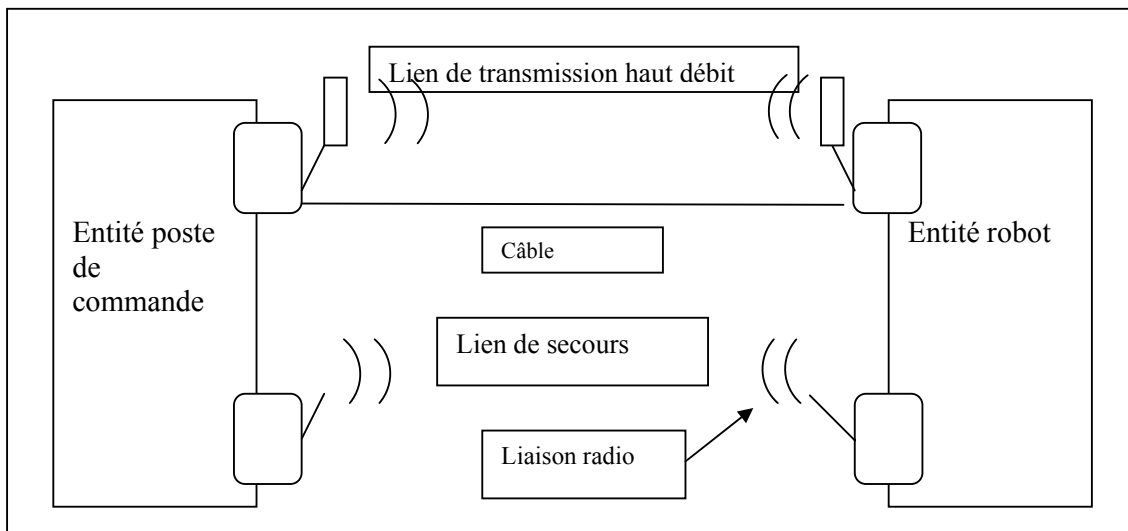
Dans le domaine nucléaire, des robots interviennent dans les opérations de surveillance, de maintenance et de démantèlement d'installations nucléaires. La configuration caractéristique qui est maintenant utilisée permet le couplage d'un médium filaire et d'un médium sans fil.

C'est le cas par exemple du véhicule d'intervention en site contaminé LMF (Leicht Manipular Fahrzeug) développé par la société CYBERNETIX [Ixa06]. Il s'agit d'un véhicule modulaire prévu pour les interventions téléopérées dans des environnements difficiles et notamment pour des opérations en environnement nucléaire. Ce type d'engin réalise l'envoi des télécommandes et des télémesures, ainsi que des images vidéo par l'intermédiaire d'un câble ou d'une liaison radio.

La partie sans fil de cette solution est elle même en deux parties :

- une liaison haut débit exploitant une modulation à étalement de spectre et un récepteur [Dan99] capable de prendre en compte une estimation de la réponse impulsionnelle du canal et de réaliser un traitement de type « RAKE » [Pro07] sur le signal reçu ;
- une liaison de secours à bas débit qui doit prendre le relais par action de l'opérateur en cas de pertes d'informations ou de rupture du lien radio haut débit (Figure I.3).

Ce mécanisme de couplage doit permettre notamment de rapatrier le robot en urgence si l'opérateur le juge nécessaire.



**Figure I. 3: Configuration de communication avec LMF**

## **b- Exemple en milieu sous- marin**

Dans le domaine sous-marin, il existe deux types principaux d'applications : celles nécessitant une intervention dans les grandes profondeurs qui font appel à des engins téléopérés ou ROV (Remotly Operated Vehicule) et celles nécessitant une exploration sur de grandes distances qui peuvent bénéficier du développement de la technologie des engins autonomes ou AUV (Autonomous Underwater Vehicule). Ces engins, pour être autonomes, doivent disposer d'une intelligence propre qui leur permet de réaliser leurs missions et de savoir réagir face à des difficultés inattendues. Les ROV sont équipés d'ombilics qui servent pour la fourniture en énergie et/ou le transfert des signaux de commande et de télémesures [Ifr07]. Ces ombilics compliquent la navigation lorsque le site est encombré, aussi la volonté de s'en passer est grande. De nombreuses études sont en cours mais se heurtent aux problèmes liés à l'autonomie énergétique, au positionnement de l'engin sur de grandes distances et aux caractéristiques très spécifiques de la propagation du signal en milieu aquatique.

### **1.1.7- Système temps réel**

En informatique industrielle, on parle d'un système temps réel lorsque ce système informatique contrôle (ou pilote) un procédé physique à une vitesse adaptée à l'évolution du procédé contrôlé [Liu00]. Selon John A. Stankovic, « la correction du système ne dépend pas seulement des résultats logiques des traitements, mais dépend en plus de la date à laquelle ces résultats sont produits ».

Les systèmes informatiques temps réel se différencient des autres systèmes informatiques par la prise en compte de contraintes temporelles dont le respect est aussi important que l'exactitude du résultat, autrement dit le système ne doit pas simplement délivrer des résultats exacts, il doit les délivrer dans des délais imposés. Les systèmes informatiques temps réel sont aujourd'hui présents dans de nombreux secteurs d'activités : dans l'industrie de production par exemple, au travers des systèmes de contrôle de procédé (usines, centrales nucléaires), dans les salles de marché au travers du traitement des données boursières en « temps réel », dans l'aéronautique au travers des systèmes de pilotage embarqués (avions, satellites), ou encore dans le secteur de la nouvelle économie au travers du besoin, toujours croissant, du traitement et de l'acheminement de l'information (vidéo, données, pilotage à distance, réalité virtuelle, etc.).

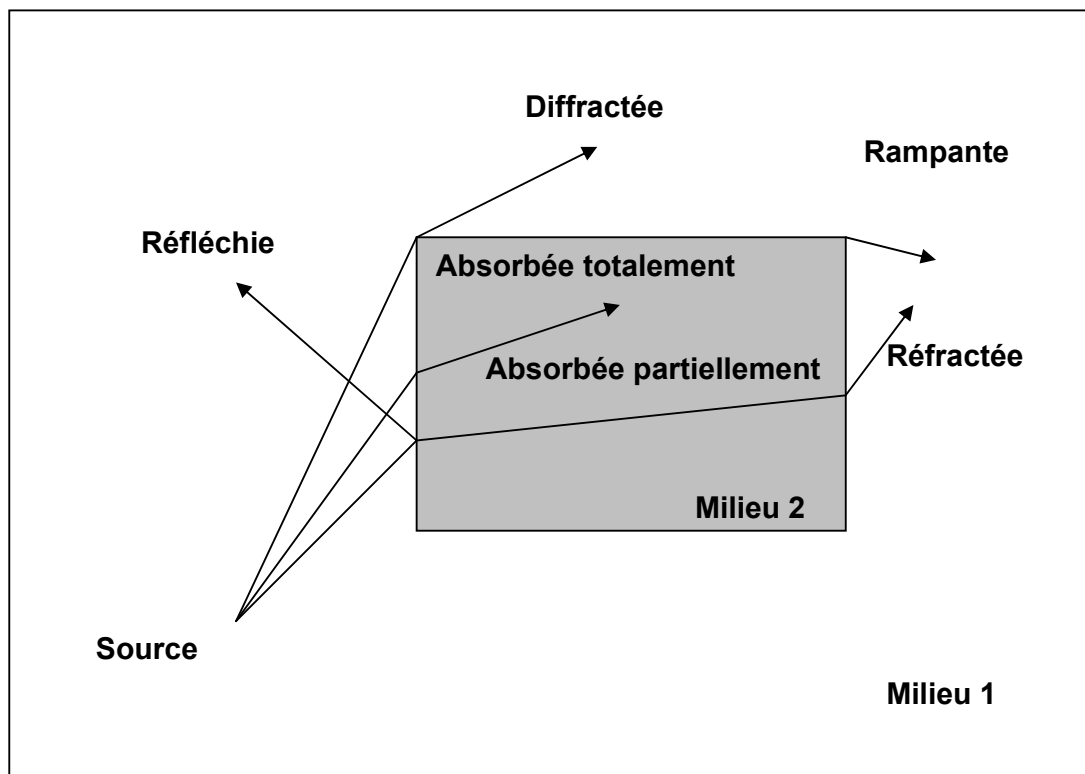
### 1.1.8- Spécificités des WLAN

Après avoir présenté l'intérêt du choix d'un réseau local sans fil, nous allons maintenant décrire les caractéristiques de ce type de réseau.

#### 1.1.8.1- Propagation du signal

Une onde électromagnétique subit des altérations de ses caractéristiques (amplitude, phase et fréquence), en fonction de l'environnement traversé et de la distance parcourue.

Les obstacles rencontrés provoquent la division du signal initial en composantes qui vont emprunter des trajets différents en exploitant les propriétés de propagation comme le présente la Figure I.4 appelée modèle optique [Dev93].



**Figure I. 4: Propagation des ondes électromagnétiques.**

Le signal reçu par le récepteur est la somme des composantes qui lui sont parvenues. Ce phénomène est appelé « trajets multiples ». Il explique la possibilité d'établir une communication entre un émetteur et un récepteur qui ne sont pas en vue directe. Il implique par contre une dispersion du délai de propagation selon les composantes qui ont emprunté des trajets plus ou moins longs, et donc une réception espacée dans le temps de ces différentes composantes. Ceci a pour conséquence de créer ce que l'on appelle des Interférences Inter Symboles (ISI pour Intersymbol Interference) préjudiciables à une bonne transmission.

Un autre effet de la propagation est la dispersion de puissance. Le signal émis est rayonné autour de l'émetteur selon les caractéristiques de l'antenne et s'atténue en fonction de la distance parcourue. Par conséquent, la puissance reçue d'un signal émis par un émetteur distant sera très inférieure à celle reçue d'un émetteur de même puissance situé à courte distance. Le signal du premier émetteur est généralement indécélable, car masqué par celui du second. Il s'agit de l'effet d'aveuglement ou « near-far effect ». Nous parlons de capture dans le cas où l'information issue du second émetteur est intègre pour le récepteur. L'incapacité caractérisant une station en train d'émettre, de détecter un signal simultanément émis par une autre station, et par conséquent une collision, découle de ce phénomène [Laf03].

Si un équipement sans fil se déplace ou si son environnement se modifie lors d'une transmission, on assiste alors à un décalage de fréquence du signal transmis appelé « effet Doppler ». Cela résulte de la variation de la distance que l'onde parcourt durant la transmission.

Les différentes composantes d'un signal arrivent déphasées l'une par rapport à l'autre au récepteur. Leur somme peut donc être nulle. Dans ce cas, nous assistons à l'évanouissement du signal.

Il est possible de remédier aux problèmes évoqués en utilisant des antennes directionnelles, alignées pour l'émission et la réception du signal. La déperdition de puissance est ainsi limitée. Cela nécessite cependant une orientation des antennes, ce qui constitue un inconvénient dans le cadre de la mobilité. Le signal est plus généralement diffusé, ce qui introduit la notion de cellule centrée autour d'un émetteur et dont le rayon est la portée du signal. Il s'agit de la zone dans laquelle le signal sera susceptible d'être réceptionné correctement. Nous parlons dans ce cas là de réseau cellulaire.

#### **1.1.8.2- Modulation du signal**

Comme nous l'avons vu, un signal émis par un adaptateur réseau sans fil d'une entité communicante est susceptible de subir plus d'altération que dans le cas de l'utilisation d'un réseau filaire en raison du rôle du médium, le résultat pouvant aller jusqu'à l'échec de la transmission. Pour pallier à cet inconvénient, des techniques destinées à améliorer la robustesse des transmissions ont été mises au point.

Aux améliorations apportées par différentes variantes de modulation de fréquence ou de phase, il a fallu adjoindre des techniques de transmission qui compensent les effets du médium et notamment sa sélectivité en fréquences. A cause de l'effet trajet multiple que nous avons présenté, pour certaines positions des entités communicantes et pour certaines



conditions relatives au médium radio, la somme des différentes composantes reçues du signal émis sur une fréquence porteuse donnée peut être nulle. Ceci met en évidence la fragilité d'une transmission réalisée en « bande étroite ». Pour consolider cette transmission, l'idée est d'utiliser simultanément ou alternativement plusieurs fréquences pour porter l'information. C'est dans ce sens qu'est utilisé l'étalement de spectre, dans le domaine des réseaux sans fil.

La première technique, le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), consiste à réaliser des changements réguliers de fréquences. La totalité de la bande passante disponible est découpée en échantillons de bandes étroites. Ainsi, des canaux sont utilisés pour diffuser le signal suivant une séquence (de sauts) préétablie et périodique. Du fait de la diversité des fréquences utilisées, si une fréquence se révèle mal adaptée à la transmission en raison d'altérations importantes du signal, il est possible que la fréquence suivante dans la séquence présente aussi des performances plus favorables (suffisantes pour que la retransmission soit réalisée avec succès dans le cas de Bluetooth par exemple). Par ailleurs il est possible de faire cohabiter dans un même espace plusieurs transmissions sans interférences, à condition que les séquences de sauts soient indépendantes, c'est-à-dire qu'un échantillon de fréquences ne soit utilisé que par une seule séquence à un instant donné. Dans ce cas idéal, les séquences sont dites orthogonales.

La deuxième technique est le DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Le principe de DSSS est de multiplier le signal par une séquence pseudo aléatoire, ce qui a pour effet d'étaler le signal sur une bande de fréquences élargie. A la réception, le signal est à nouveau multiplié par la séquence duale avec pour conséquence de recomposer le signal initial. Cette technique présente l'avantage de dissimuler le signal qui peut être assimilé au bruit radio ambiant [Gui06].

Par ailleurs, l'opération de reconstitution a pour effet de diminuer le niveau du bruit ou de tout autre signal émis sur la même bande de fréquences. L'utilisation d'une bande de fréquences élargie améliore la robustesse des transmissions de manière similaire à ce que nous observons avec le FHSS. En utilisant des séquences ou codes compatibles, il est possible de transmettre en même temps sur une même bande de fréquences sans interférences.

La méthode la plus récente se nomme OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Le principe de cette modulation multi porteuses est d'utiliser  $n$  porteuses à  $d/n$  symboles par seconde au lieu d'une seule à  $d$  symboles par seconde. Cette technique permet de réduire d'un facteur  $n$  les interférences inter symboles dues aux trajets multiples.

Même si elle est plus complexe à implémenter, elle est maintenant exploitée dans les versions récentes des WLAN (802.11n par exemple) pour offrir robustesse et débit.

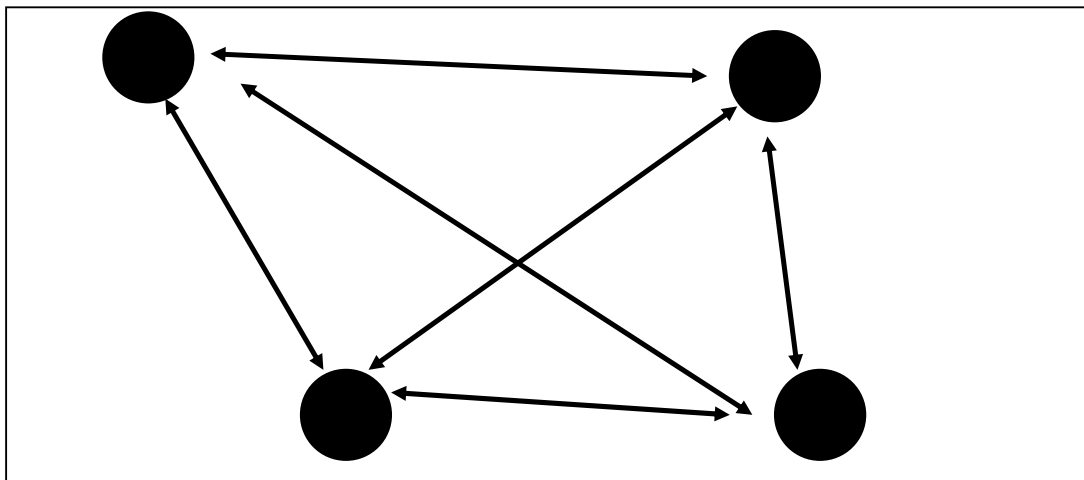
FHSS et DSSS sont utilisés dans la bande de fréquences des 2,4 GHz. Cette bande de fréquences fait partie des bandes ISM, mondialement allouées aux applications industrielles, scientifiques et médicales. Des dispositions réglementaires, propres à chaque pays, en définissent les conditions d'utilisation notamment en ce qui concerne la puissance d'émission des produits. En France l'ART (Autorité de Régulation des Télécommunications) est l'organisme qui définit les conditions à respecter dans l'utilisation des fréquences hertziennes. OFDM est plus particulièrement utilisée dans la bande de fréquences ISM des 5 GHz.

### 1.1.8.3- Architecture

La communication des stations au sein d'un réseau sans fil peut être organisée de différentes manières. Il existe trois topologies principales.

#### a- Ad Hoc

Dans un réseau ad hoc, les stations présentes communiquent de manière égalitaire entre elles. La Figure I.5 illustre ce principe où les stations sont toutes à portée l'une de l'autre.



**Figure I. 5: Réseau ad hoc.**

Le réseau ad hoc multi-sauts, améliore le système précédent en permettant à deux stations hors de portée l'une de l'autre de communiquer. Dans ce cas, l'information est propagée de station en station jusqu'à atteindre son destinataire final. La principale difficulté est d'employer un algorithme de routage efficace pour une évolution dynamique de cette topologie. La Figure I.6 présente l'intérêt de ce mode de fonctionnement. Les stations A et C ne sont pas à portée directe. Elles communiquent sur cet exemple, par l'intermédiaire de la station B.

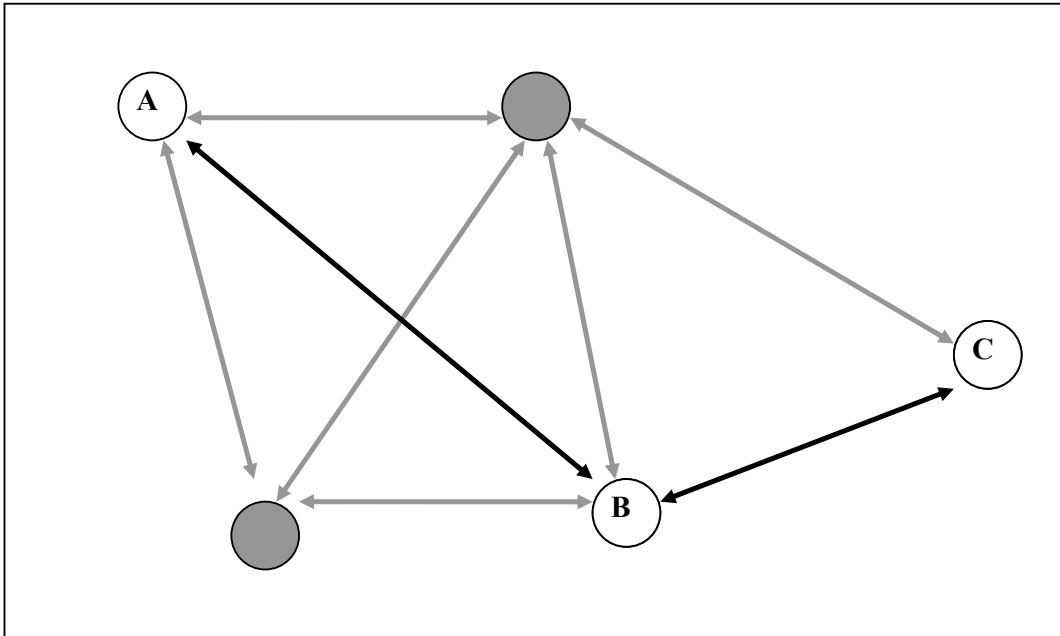


Figure I. 6: Réseau ad hoc multi-sauts.

#### b- Topologie avec infrastructure

Le réseau avec infrastructure fait intervenir une utilisation différenciée des stations.

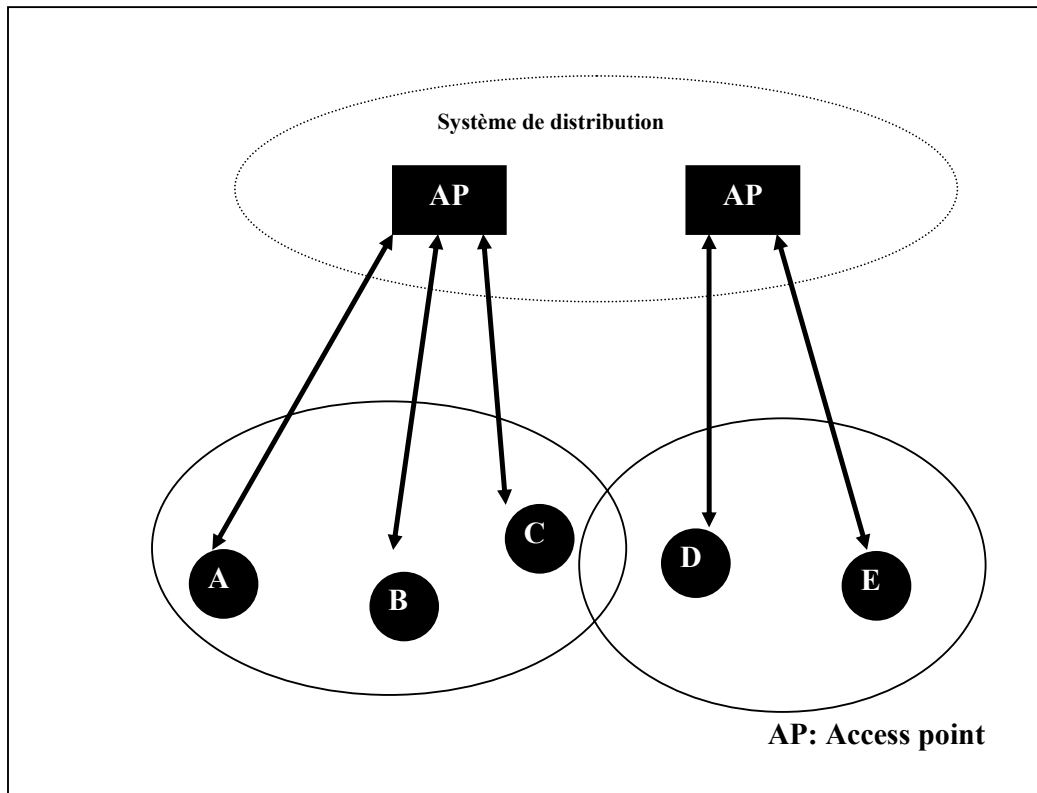


Figure I. 7: Réseau avec infrastructure.

Dans une telle topologie, certaines stations particulières ont un rôle de « Pont-Routeur » [Val94] Il s'agit des points d'accès dans la norme 802.11, ils gèrent chacun les communications dans leur zone de couverture (i.e leur cellule) [Bin02]. Les autres stations sont affiliées à leur station principale (ou point d'accès (AP)). Le plus souvent, les stations principales sont reliées à un système de distribution, généralement filaire, qui permet la communication avec des stations dans d'autres cellules distantes. La station principale (ou point d'accès) permet de donner un accès au réseau filaire (auquel il est raccordé) aux différentes stations avoisinantes équipées de cartes sans fil. Nous parlons dans ce cas de réseau cellulaire avec infrastructure susceptible d'offrir une couverture complète d'une surface par la disposition adaptée de plusieurs cellules. Les services offerts par cette organisation sont variés. Cette solution correspond généralement bien aux objectifs des applications qui nous concernent dans ce travail.

### **c- Les réseaux Mesh**

Le mot Mesh (ou Meshed) caractérisait initialement le taux de maillage d'un réseau Ad hoc (full Mesh pour maillage total par exemple). Ce mot désigne maintenant une topologie hybride entre Ad Hoc et avec infrastructure.

C'est une technologie de rupture comparée aux solutions centralisées classiques sans-fil avec station de base. Les solutions « Mesh » autorisent un déploiement rapide et simplifié, une grande évolutivité de la couverture et, de par leur maillage, une forte tolérance aux pannes et aux interférences, réduisant significativement les coûts d'installation et d'exploitation des réseaux. Ces solutions reproduisent l'architecture de l'Internet tout en l'optimisant pour le sans-fil.

#### **1.1.9- Méthodes d'accès dans WLAN**

Une méthode d'accès dans un réseau est l'ensemble des règles qui va permettre aux machines (ou stations) de se partager le support de transmission aussi désigné par « médium » ou canal. La plupart des méthodes d'accès classiques des réseaux locaux ne peuvent pas être employées en l'état par un réseau sans fil essentiellement à cause de l'effet d'aveuglement [MIS05].

Dans le cadre des protocoles à compétition, la méthode CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) popularisée par Ethernet présente un inconvénient majeur. La détection de collision ne peut pas être réalisée car une station qui émet n'a pas la possibilité physique d'écouter le canal de transmission pour détecter une éventuelle perturbation de son signal due à une collision. Les solutions imaginées pour compenser cela reposant sur une écoute furtive entre deux instants d'émission (à travers les dents d'un peigne : méthode Comb

[Hed04]) ne sont pas faciles à mettre en œuvre à cause de la précision temporelle des commutations à réaliser.

Une variante de cette méthode a été développée pour pallier à cet inconvénient. Il s'agit de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). Le principe en est simple : une station qui souhaite émettre une trame observe une période d'écoute du canal de durée en partie aléatoire. Si la période d'écoute se termine sans que la station ne détecte une activité sur le canal, la station émet la trame. Dans le cas où la station détecte une activité, elle suspend le décompte de sa période d'écoute jusqu'à ce que le canal redevienne libre. Elle reprend ensuite l'observation du canal jusqu'à consommer le reliquat de son temps d'attente. Le processus est répété jusqu'à ce que la trame soit émise. Il est à noter que ce principe n'élimine pas totalement la possibilité de collisions mais réduit sensiblement la probabilité qu'elles se produisent [Muh02] Cette méthode d'accès sera détaillée en 2.5.3.

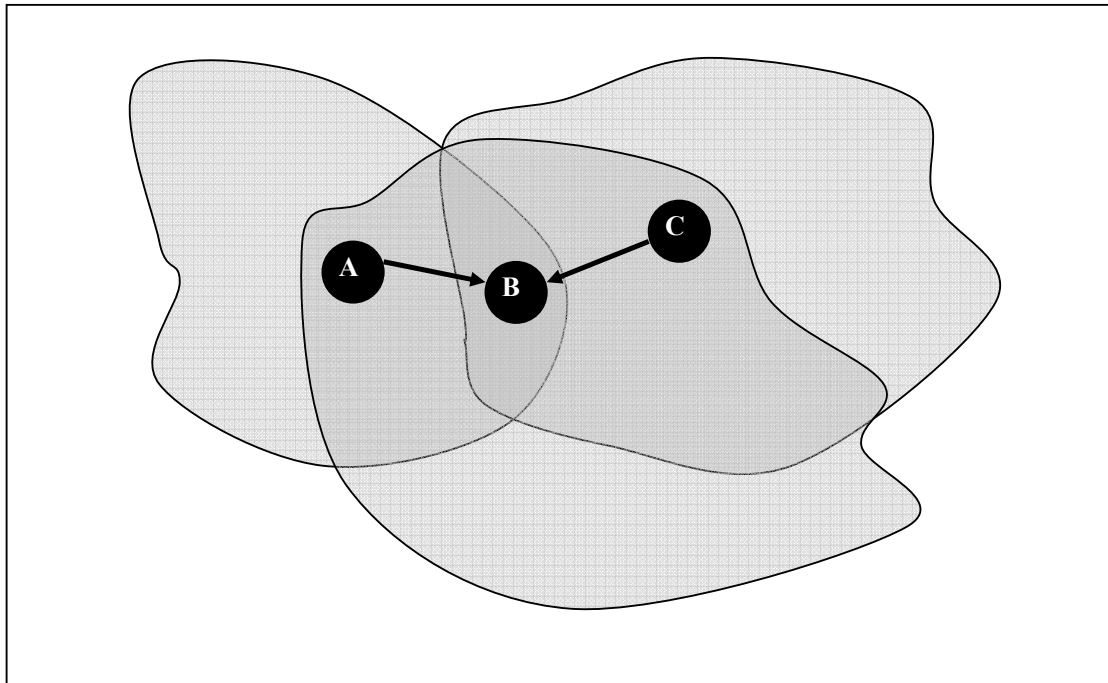
Dans le cadre des protocoles à accès contrôlé, plusieurs pistes ont été explorées. Le principe d'un réseau à jeton est difficilement exploitable du fait de la possibilité élevée de disparition du jeton et de la difficulté de régénération de ce jeton dans le cadre d'une architecture décentralisée [Fre95][Her04].

Une autre méthode est l'allocation d'une ressource dans les réseaux avec infrastructures. La station principale (Station de Base dans le domaine de la téléphonie cellulaire par exemple) distribue un temps d'accès au canal en TDMA (Time Division Multiple Access) ou bien une fréquence en FDMA (Frequency Division Multiple Access) aux différentes stations de la cellule qui en font la demande dans une première phase généralement soumise aux règles de la compétition. Les règles d'allocation peuvent intégrer la notion de priorité.

La méthode CDMA (Code Division Multiple Access) exploite une modulation reposant sur l'étalement de spectre. Elle repose sur l'utilisation de codages particuliers des signaux émis sur une bande de fréquences. Les propriétés de ces codages (codes d'étalement) permettent aux différents signaux d'être reconstitués sans perturbation l'un par rapport à l'autre, à leur réception. Dans ce cas, c'est un lot de codes compatibles qui est distribué par la station de base.

#### **1.1.10- Problème du terminal caché dans les WLAN**

La notion de portée du signal décrite dans 1.1.8.1 explique le problème du « terminal caché » [Laf03] illustré par la Figure I.8.



**Figure I. 8: Problème du « terminal caché ».**

La station A est à portée de la station B mais pas de la station C. B est à portée de A et de C. A émet une trame vers B. Si simultanément C souhaite démarrer une transmission vers B, C ne pouvant détecter l'émission de A pour commencer sa transmission ce qui risque de provoquer une collision des signaux au niveau de B.

#### **1.1.11- Différences entre réseaux locaux sans fil classiques et réseaux sans fil industriels**

Pour les applications industrielles, nous avons besoin de produits spécifiques qui peuvent être robustes, résistants, étanches, capables de fonctionner sur des plages de température étendues, voire en atmosphères explosives. C'est pour cela qu'il est possible de distinguer les produits "wireless" grand public et les produits "wireless" industriels [Pey04].

Les différences entre ces deux types ne s'arrêtent pas là. Puisque l'environnement industriel diffère d'un environnement classique par les conditions environnementales, il faut que les produits destinés aux applications industrielles soient capables de fonctionner dans des environnements électromagnétiques beaucoup plus difficiles que ceux qui règnent dans les bureaux ou les logements. Les équipements à connecter ne sont pas toujours au voisinage les uns des autres, il y a de multiples obstacles sur lesquels viennent se réfléchir ou se diffracter les ondes radio. De plus, certains équipements industriels, tels que des postes de soudure à arc ou des matériels fonctionnant à l'aide de micro-ondes (fours, capteurs de niveau, radars, etc.), génèrent des ondes électromagnétiques qui sont susceptibles de perturber les transmissions radio.

Tous les acteurs du marché des équipements de réseaux locaux sans fil invitent à lire avec une certaine prudence les fiches de caractéristiques des produits de transmission radio. Les chiffres donnés correspondent souvent à des situations très favorables que l'on rencontre rarement sur le terrain. Il est par exemple abusif de parler de déterminisme. Le débit peut être élevé (pour les produits Wi-Fi surtout) mais il y a toujours un temps de latence, qui peut atteindre facilement plusieurs centaines de millisecondes quand il s'agit de traverser de tels réseaux.

### **1.1.12- Conclusion de la première partie**

Dans le domaine de la production industrielle, des chaînes de fabrication ou de stockage, des besoins de solutions réseau apparaissent pour assurer des communications entre les entités évoluant dans des zones généralement bien limitées, ceci pour réaliser des applications bien déterminées. Pour mettre en œuvre ces applications et pour satisfaire leurs besoins, des contraintes existent comme : la mobilité, la robustesse, ...

Dans un tel contexte, les réseaux sans fil représentent une gamme de solutions intéressante notamment dès qu'il s'agit de considérer la mobilité de certaines entités communicantes. Il faut néanmoins être conscient du fait que certaines des performances offertes par les WLAN diffèrent de celles des réseaux câblés (débit, fiabilité par exemple). De plus, des propriétés spécifiques sont attendues pour les réseaux sans fil dédiés aux applications industrielles.

## **1.2- Les réseaux locaux sans fil**

### **1.2.1- Caractéristiques de 802.11**

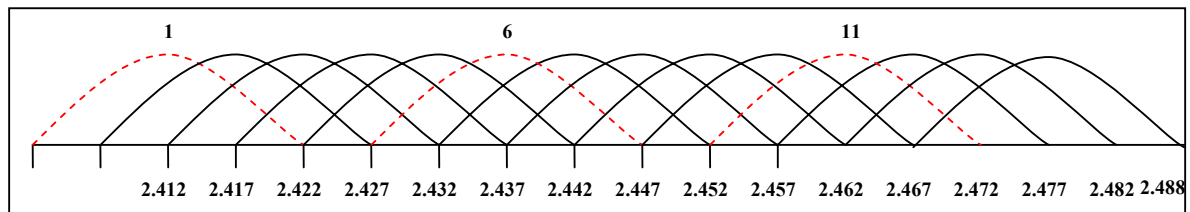
La première norme IEEE 802.11 a été éditée par l'« Institute of Electrical and Electronic Engineer » (IEEE) en 1997 [Iee97]. Cet institut à l'origine majoritairement composé d'ingénieurs américains, est organisé en groupes de travail dont les travaux et les discussions aboutissent souvent à des normes. La norme IEEE 802.11 entre dans le cadre général des normes 802, qui définissent des réseaux locaux. Cette norme est un standard international qui définit un réseau local sans fil à travers les deux couches basses de ce réseau : la couche physique et la couche liaison du modèle de référence OSI (Open System Interconnection). La norme IEEE 802.11 a maintenant plusieurs extensions, chacune redéfinissant la couche physique et/ou différentes variantes de la méthode d'accès au médium offrant différents débits, services et/ou qualité de service.

#### **1.2.1.1- Le Médium**

Le médium est, dans le cas de 802.11b, l'ensemble des ondes radios dans la bande de fréquence ISM 2.4-2.5 GHz qui est utilisable sans licence. Il existe 13 canaux allant de 2.412

GHz à 2.472 GHz, par pas de 5 MHz, et un quatorzième étant situé à 2.484 GHz. Ces canaux ne sont pas indépendants, puisque l'utilisation d'un canal interfère avec les canaux voisins. D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage doit être au minimum égale au double du signal à numériser [Muh02]. Ainsi une transmission à 11 Mbps utilisera donc une bande de fréquence de 22 MHz.

Au final, en respectant cette contrainte il n'est pas possible de trouver plus de 3 canaux réellement indépendants, il peut s'agir par exemple des canaux : un, six et onze. Le canal 14 étant, en France, réservé à l'armée [Pil04].



**Figure I. 9: Étalement de fréquence par une transmission à 11 Mbps.**

### 1.2.1.2-Les topologies

La norme définit actuellement deux topologies d'un réseau local sans fil : la topologie ad-hoc, où les stations sont interconnectées entre elles, et une topologie avec infrastructure pour laquelle les stations communiquent via un ou des points d'accès et une infrastructure [Bin02]. Dans le cadre de cette thèse, nous avons été amenés à travailler avec le mode infrastructure, c'est pour cette raison que le mode ad-hoc ne sera pas présenté en détails. On peut toutefois schématiser ce mode comme suit.

Dans le mode ad-hoc, toutes les stations communiquent directement les unes avec les autres sous condition du respect de la contrainte de portée. En d'autres termes, deux stations peuvent uniquement communiquer si elles se trouvent chacune dans le rayon de portée de l'autre. C'est une liaison point à point qui est établie entre celles-ci (Figures I.5 et I.6).

La configuration la plus fréquente reste la configuration avec infrastructure dont nous allons présenter deux formes.

Un réseau sans fil simple en mode infrastructure, est un réseau pour lequel un seul point d'accès est présent. L'usage de plusieurs points d'accès reliés par une infrastructure permet de couvrir une zone de communication plus grande par un agencement de cellules.

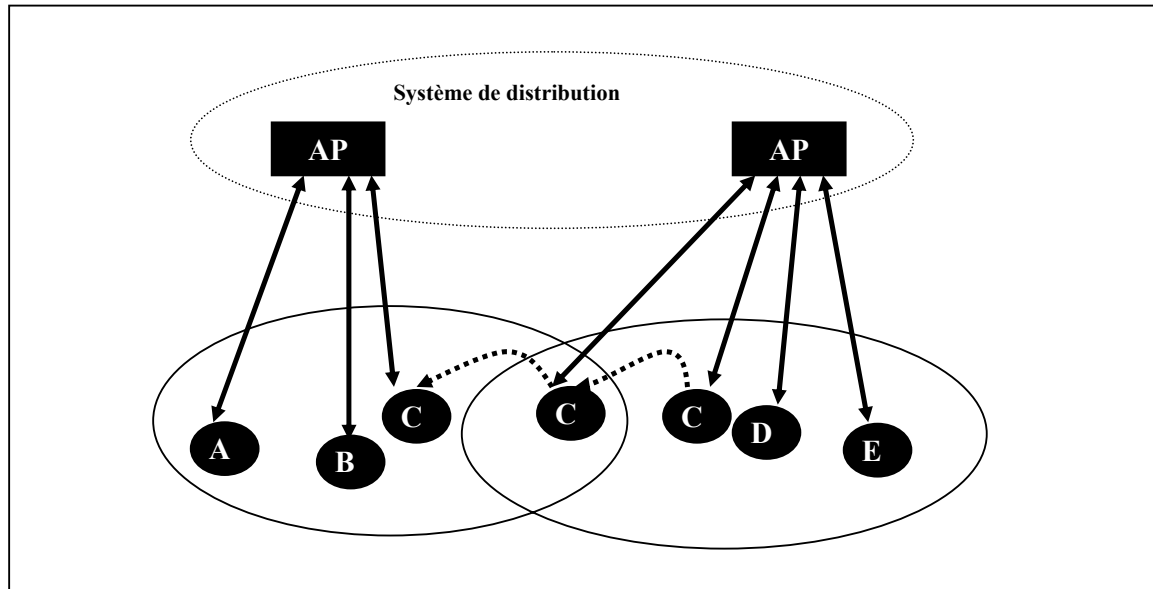
Un point d'accès est une station fixe qui permet de relier les stations (éventuellement mobiles), qui sont sous sa couverture à une infrastructure, le plus souvent un réseau filaire relié à l'internet. Un point d'accès a sa propre couverture cellulaire. Celle-ci varie en fonction d'un grand nombre de paramètres :



- l'environnement alentour (plein air ou dans un bâtiment, environnement industriel caractérisé par la présence de machines dans notre cas) ;
- la puissance d'émission (qui est limitée à 100mW en Europe, 1mW au Japon et 1W aux États-Unis). Un point d'accès a quelques particularités, comme un identifiant de service de base (BSSID ou Basic Set Service Identifier) ainsi qu'un identifiant d'ensemble de service étendu (ESSID ou Extended Service Set ID).

La norme prévoit aussi la réalisation d'une couverture plus importante en mettant en place un système de distribution (Distribution System), ce système est établi en reliant les points d'accès par un réseau le plus souvent câblé. Cette fois, chaque point d'accès a son propre BSSID (en l'occurrence son adresse MAC), mais de tels points d'accès font partie du même ESSID, permettant ainsi aux mobiles de bouger dans la zone de couverture des points d'accès sans avoir à changer de réseau (Figure I.10).

Dans une telle configuration, on note l'apparition d'une zone de couverture commune à plusieurs points d'accès. Cette zone est appelée zone de recouvrement, en effet c'est la zone où les stations sont sujettes au changement de point d'accès en réalisant un « hand-over » qui sera décrit plus loin. On peut tout aussi bien imaginer qu'il n'y ait pas de zone de recouvrement ce qui amènera une discontinuité dans les communications.



**Figure I. 10: Topologie avec infrastructure.**

### 1.2.1.3 - Le point d'accès

Un point d'accès émet régulièrement des trames de synchronisation, ou trames balises, ou encore « beacon ». Ces trames sont de petite taille et contiennent des informations sur le point

d'accès, comme par exemple l'ESSID et le BSSID ou encore les vitesses de transmission supportées. Les stations écoutent les trames balises émises par le point d'accès auquel elles sont rattachées ou affiliées. Elles peuvent aussi par le biais d'un changement de canal connaître à tout moment tous les points d'accès disponibles dans leur rayon de couverture. Pour avoir la liste des points d'accès dans son environnement, une station peut effectuer une recherche passive où elle ne fait qu'écouter sur l'ensemble des canaux si des « beacons » sont émis par les points d'accès présents à proximité.

Au préalable une station doit s'être affiliée auprès d'un point d'accès pour pouvoir dialoguer. L'affiliation est définie dans la norme, c'est un échange précis de trames permettant l'enregistrement de la station auprès du point d'accès (inscription dans une table d'affiliation). L'affiliation est en fait un mode connecté entre le point d'accès et la station.

Une station affiliée à un point d'accès échange des trames uniquement avec celui-ci. Pour que des stations affiliées à un même point d'accès puissent échanger des trames entre elles, celles-ci doivent transiter par ce point d'accès. Dans une mode avec infrastructure, l'AP agit donc comme relais. Il doit ainsi faire suivre les trames reçues depuis une de ses stations à une autre soit directement si la station cible est aussi une de ses stations affiliées soit via l'infrastructure si ce n'est pas le cas. Toutes les trames passent donc par au moins un point d'accès.

### **1.2.2- HiperLAN**

Elaborée sous la tutelle de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Hiperlan est une norme exclusivement européenne. Elle offre à l'origine un débit de 20 Mbps, mais la version la plus récente (Hiperlan2) permet d'atteindre 54 Mbps sur un rayon d'action semblable à celui de WiFi et HomeRF (100 mètres). Son originalité réside dans le fait qu'Hiperlan (versions 1 et 2) exploite la gamme de fréquence de 5 Ghz alors que WiFi, HomeRF et Bluetooth sont principalement « installés » sur les 2,4 Ghz. Les origines et le côté avant-gardiste et sophistiqué de cette norme l'ont privé de succès.

### **1.2.3- Les réseaux de type WPAN**

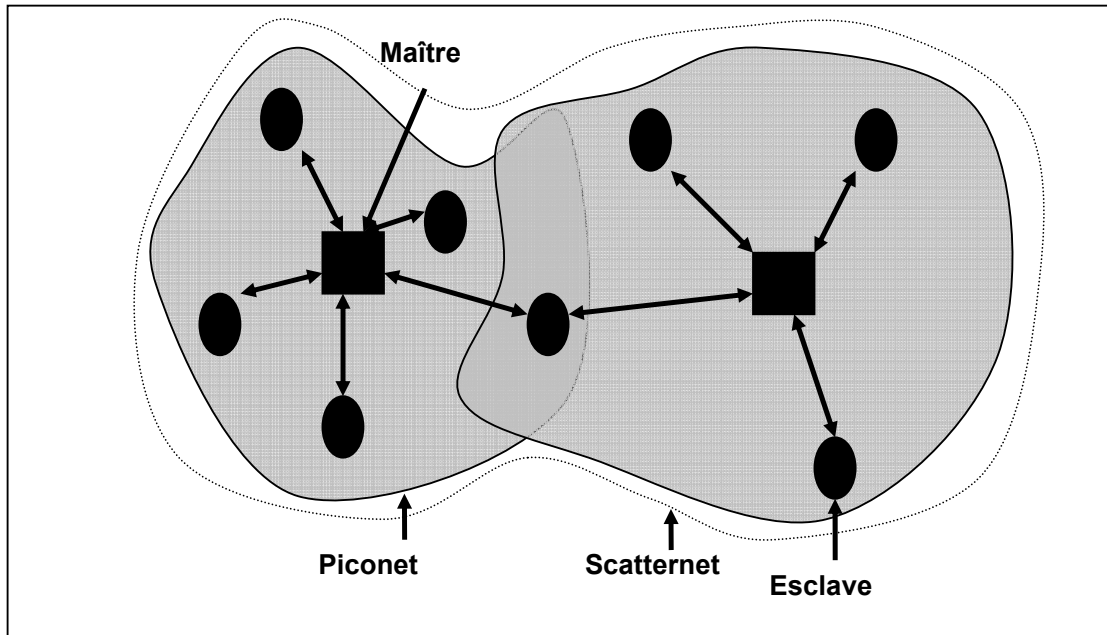
Les réseaux personnels sans fil (appelés également réseaux individuels sans fil ou réseaux domestiques sans fil et notés WPAN pour Wireless Personal Area Network) concernent les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseaux sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire. Il peut aussi permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées dans les WPAN.

### 1.2.3.1- Bluetooth

La norme Bluetooth est née de l'initiative de l'entreprise suédoise Ericsson, acteur majeur des communications, notamment dans le domaine de la téléphonie mobile au travers de produits conformes aux normes GSM et DECT [Har04][Blu01][Blu07]. Un groupe de travail, le Bluetooth SIG (Bluetooth Special Interest Group) a par la suite poursuivi la définition des spécifications de Bluetooth. Ce groupe comporte actuellement des milliers des sociétés dont les principaux représentants sont Ericsson, IBM, Intel et Nokia. Parallèlement, un groupe de travail a été mis en place au sein de l'IEEE sous le nom de 802.15 dans le but de transcrire au format IEEE les spécifications existantes et de développer de futures versions plus performantes.

Bluetooth est un système de communication radio à courte portée, faible coût et moyen débit. Les éléments d'un réseau Bluetooth sont interconnectés au sein d'un PAN (Personal Area Network).

Un réseau Bluetooth est le plus souvent constitué d'un ou de plusieurs « piconets ». Dans un piconet, une station maître fédère jusqu'à sept esclaves actifs et distribue les droits d'accès. Toutes les transmissions transitent par le maître. Plusieurs piconets forment un « scatternet » qui est un réseau plus étendu. Pour former un scatternet, une station esclave se lie successivement à deux maîtres de piconets différents ou un esclave d'un piconet est maître d'un autre piconet. La Figure I.11 présente un scatternet formé de deux piconets.



**Figure I. 11: Piconet et scatternet bluetooth.**

Bluetooth utilisait le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) et maintenant l'AFH (Adaptive frequency-hopping spread spectrum) sur la bande ISM des 2,4 GHz. 79 sous-bandes d'une largeur de 1 MHz sont situées entre 2,402 et 2,480 GHz. La modulation utilisée est GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). La séquence des sauts est définie de manière pseudo-aléatoire, l'adresse MAC du maître intervient notamment dans son processus de génération. Les sauts sont effectués 1 600 fois par seconde. Les transmissions interviennent sur des slots agrégés d'une durée élémentaire de 625 microsecondes qui interviennent entre deux sauts. Un paquet peut occuper un maximum de 5 slots consécutifs. Dans le cas d'une transmission utilisant plus d'un slot, le saut de fréquence sera différé à la fin de la transmission du paquet. Les slots sont utilisés successivement pour la transmission d'une trame du maître vers l'esclave et de l'esclave vers le maître. Un équipement Bluetooth fonctionne en mode émission et réception alternée TDD (Time Division Duplex). Le maître effectue un polling actif sur chaque esclave. L'esclave peut alors émettre une trame. Les transmissions peuvent être synchrones ou asynchrones. Une communication synchrone peut atteindre un débit de 64 kbps adapté au transfert de la voix. En asynchrone le débit maximal est de 732 kbps (version 1.1).

Une station qui souhaite rejoindre un piconet doit faire parvenir au maître une demande d' enrôlement. Pour ce faire, il faut que la station se synchronise sur la séquence de sauts de fréquences du piconet. Cette procédure d' enrôlement qui nécessite une phase de synchronisation présente une durée assez longue, peu adaptée à un changement rapide de piconet [Her04]. Ceci est un handicap pour les applications considérées dans ce travail.

Les produits Bluetooth sont commercialisés depuis plusieurs années. Au niveau bureautique, il est ainsi possible de relier des périphériques, par exemple une imprimante, à un ordinateur au moyen d'une liaison Bluetooth. Le faible coût et la disparition des câbles de liaison sont des avantages significatifs pour l'adoption de ce type de produit.

### **1.2.3.2 -Zigbee**

Zigbee est une technologie sans fil radio, de basse puissance et de bas débits (en dessous de 250 kbps). Sa portée est variable. Elle oscille suivant l'environnement entre 10 et 50 mètres en intérieur. C'est une technologie ouverte ratifiée par l'IEEE comme en atteste le standard 802.15.4 [Erg04][Zig07][Bar07][Van07]. Cette technologie ne nécessite pas de licence spécifique. Zigbee fonctionne sur les bandes de 2,4 GHz (bandes du Bluetooth et du Wi-Fi), mais aussi dans la bande 866 MHz libre en Europe et dans la bande 916 MHz libre aux USA. L'avantage majeur de Zigbee est que la technologie est peu consommatrice en énergie. Elle peut, de plus, être intégrée à bas coût dans les équipements.

Ces matériels bon marché se retrouvent alors dans bon nombre d'applications de contrôle de commandes : éclairage, acquisition de données industrielles, boutons poussoirs...

Les spécifications de ZigBee 1.0 sont disponibles auprès des membres de la communauté industrielle ZigBee Alliance. ZigBee Alliance est une association d'industriels visant à développer un standard de communication sans fil dédié aux réseaux de capteurs et au monitoring de production [Zig07].

#### **a- Les topologies dans Zigbee**

La couche réseau de Zigbee (NWK Layer) supporte les topologies en étoile, arbres et maillées (star, tree and meshed networks). Zigbee est particulièrement optimisé pour les applications à contraintes temporelles, il faut en effet moins de 30 ms à un nouveau noeud pour rejoindre le réseau, moins de 15 ms pour qu'il passe de l'état de veille à actif.

Chaque réseau Zigbee est constitué des modules suivants :

<b>Zigbee Coordinator (ZC)</b>	<b>Zigbee Routeur (ZR)</b>	<b>Zigbee end Device (ZED)</b>
Un seul par réseau Zigbee  - Initialise le réseau.  - Se comporte en routeur une fois le réseau initialisé.  - Contient toute la pile protocolaire.	Composant réseau optionnel.  - S'associe avec le ZC ou avec un ZR déjà associé.  - Se comporte comme un coordinateur 802.15.4.  - Participe au routage des messages.  - Contient toute la pile protocolaire.	Composant réseau optionnel.  - Ne permet pas d'associations.  - Ne participe pas au routage.  - Embarque une pile légère.

**Tableau I.1 : Modules de Zigbee.**

La figure I.12 montre les différentes topologies de Zigbee : Star, Tree et Mesh.

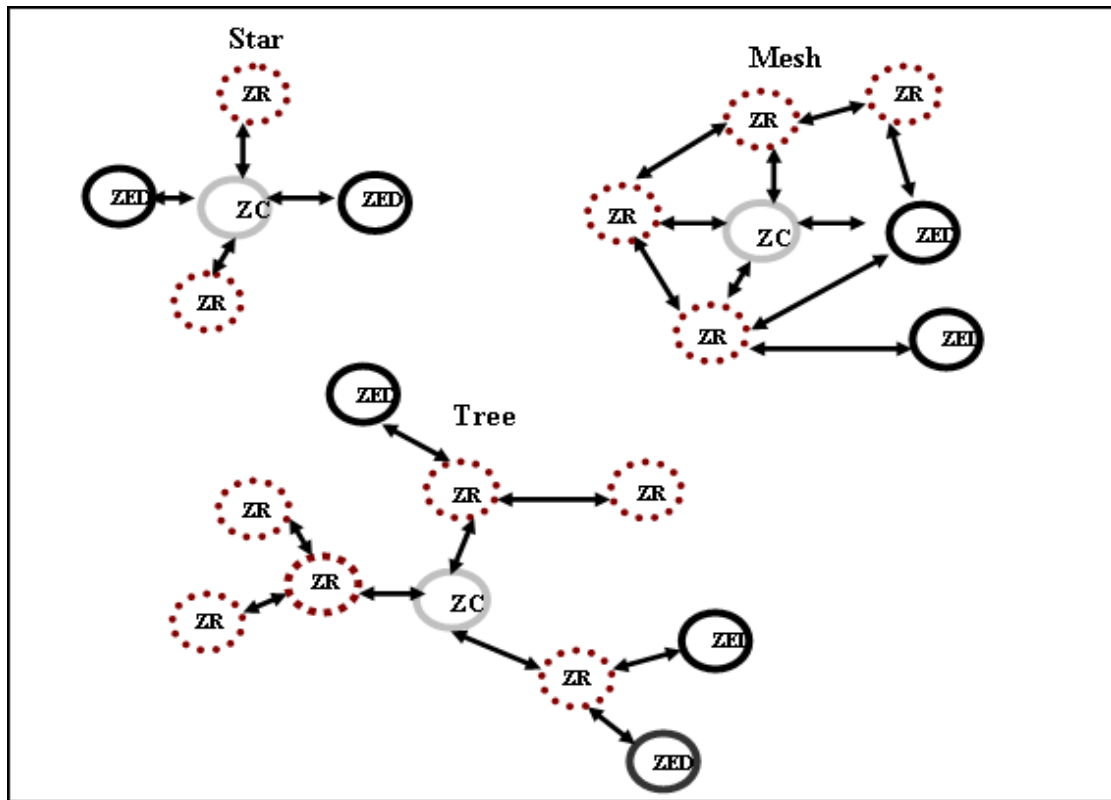


Figure I. 12: Différents topologies de Zigbee.

Dans la topologie en étoile, le réseau est contrôlé par seulement un dispositif appelé « Zigbee Coordinator ». C'est ce noeud coordinateur qui a en charge d'initialiser et de maintenir les autres dispositifs sur le réseau qui communiquent directement avec lui.

Dans les topologies maillées et en arbres, le « Zigbee Coordinator », aussi appelé PAN Coordinator, a en charge de démarrer le réseau et d'en choisir certains paramètres clés, ce réseau pouvant être étendu à l'aide de routeurs Zigbee (FFD).

Pour les topologies de type réseaux maillés les échanges reposent sur des communications pairs à pairs (peer to peer).

#### b- Routage des messages dans Zigbee

Au niveau de la couche réseau, le routage est soit direct, soit indirect. Le routage est direct lorsqu'un dispositif voulant transmettre des données connaît l'adresse réseau du destinataire. Cette adresse est donc transmise dans la trame pour atteindre et agir sur le dispositif prévu.

Dans le cas contraire, le routage indirect se fait lorsqu'un dispositif ne connaît pas l'adresse du destinataire. Un équipement de type routeur ou coordinateur fait la relation avec le vrai destinataire d'après la table de routage et la table de découvertes des routes. Un dispositif qui n'a pas les capacités de routage (ZED) doit router les données suivant le

routage hiérarchique (il remonte l'arbre) en passant pas le coordinateur auquel il est attaché, ceci pour une topologie de type Cluster Tree.

La table de routage contient les données sur les destinataires. Il s'agit d'un ensemble de relations entre une adresse de destination de la route et un prochain dispositif à atteindre pour se « rapprocher » du destinataire.

La table de découverte d'une route contient les informations sur les sources du message. Elle stocke l'adresse d'origine du dispositif qui a fait la demande et l'adresse du dispositif qui va transmettre les données en tant qu'intermédiaire (entre la source et la destination). Elle contient aussi les coûts de transmission entre la source jusqu'au nœud actuel et du nœud jusqu'au destinataire. Elle peut donc adapter la route pour être plus performante en mettant à jour les adresses à utiliser [Bar07].

L'algorithme de routage suggéré par la ZigBee Alliance pour les réseaux maillés est AODV (Ad hoc On-Demand Vector Routing). C'est un protocole de routage dit "réactif" : une route est établie uniquement sur demande. L'avantage est qu'il ne charge pas le trafic par l'entretien d'une route qui ne sera pas utilisée.

Le routage au niveau applicatif se fait grâce à la table de liaison, contenu dans le coordinateur ou un routeur.

### **1.2.3.3- Avantages de Zigbee face à Bluetooth**

Les technologies et les segments de marché pour ces deux technologies sont différents. Bluetooth apporte de meilleurs débits (1Mbps contre 250 Kbps en débits théoriques pour Zigbee) mais sa consommation est aussi plus élevée. Zigbee s'intègre à plus bas coût et consomme bien moins d'énergie. Bluetooth est plus adapté aux communications pour la voix (oreillettes) ou aux raccordements d'équipements à un PC.

## **Conclusion du chapitre 1**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art de notre thèse. Dans un premier temps, nous avons défini les applications industrielles, puis nous avons présenté les types des réseaux à utiliser pour faciliter les communications entre les entités existantes de ces applications.

Dans le chapitre suivant, nous présentons la problématique de notre sujet en parlant des principaux modèles de propagation existants, les contraintes du médium radio et des types d'échanges intracellulaires.

# Chapitre 2

## **Problématique du sujet**



## **Introduction**

Le but de notre étude est d'arriver à étudier les échanges entre mobiles évoluant dans un environnement industriel. Pour ce faire nous avons choisi d'utiliser une démarche de simulation. Dans ce chapitre nous allons présenter les principaux points qui résultent de ce choix. C'est pourquoi dans un premier temps les principaux modèles de propagation existants et les contraintes de la propagation radio seront décrits. Dans un deuxième temps, nous aborderons différents types d'échanges intracellulaires pour mettre en avant les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. Une partie importante sera consacrée à la méthode d'accès au médium de la norme 802.11, nous insisterons en particulier sur les effets de l'algorithme BEB sur lequel portera une de nos contributions.

## **2.1- Les Principaux Modèles de Propagations**

### **2.1.1- Intérêt de l'étude de la propagation des ondes radio**

Il peut être essentiel de comprendre les principes de la propagation des ondes pour pouvoir prédire les chances et les conditions d'établissement d'une liaison radio entre deux points de la surface de la Terre ou entre la Terre et un satellite. Dans notre cas il s'agit d'étudier une liaison entre deux mobiles ou entre un mobile et un point d'accès.

Une étude des conditions de propagation peut se justifier à différents niveaux, il peut en découler des résultats divers. Elle permet par exemple :

- le calcul de la puissance minimale d'un émetteur de radiodiffusion afin d'assurer une réception confortable sur une zone déterminée ;
- la détermination de la position d'un relais pour la radiotéléphonie mobile ;
- l'estimation des chances d'établissement d'une liaison transcontinentale sur ondes courtes ;
- l'étude des phénomènes d'interférence entre émetteurs ;
- le calcul du champ électromagnétique à proximité d'un équipement d'émission (radar, relais, émetteur de télévision...) pour déterminer les risques encourus par la population se trouvant à proximité [Gou67].

Dans notre cas, cela va permettre d'estimer le rôle des équipements de chaînes de production (machines de moulage de savonnets et de conditionnement par exemple) dans la propagation des ondes radio utilisées pour porter les informations échangées entre des robots mobiles.

### **2.1.2- Les contraintes de la propagation radio**

Comme nous l'avons dit dans le premier chapitre (1.1.8.1), la propagation des ondes radio obéit à des règles complexes, surtout lorsqu'il y a des obstacles entre l'émetteur et le récepteur.

Une onde peut également suivre plusieurs chemins différents pour aboutir en un même point, de telle sorte que le récepteur peut recevoir différentes copies du même signal à des instants différents. Ces phénomènes dépendent bien sûr de la fréquence utilisée et de la nature des obstacles rencontrés (murs en béton, forêt dense, façade en verre ou espace ouvert). Nous avons vu que ceci conduit notamment à un phénomène d'atténuation, voire d'évanouissement (fading) une des résultantes de l'effet multi-trajets.

Comme souvent, lorsque les phénomènes sont complexes, on s'appuie sur des modèles mathématiques, c'est-à-dire une série d'équations qui donnent une « bonne idée » du phénomène. La notion de « bonne idée » est bien sûr relative au degré de précision désiré : plus la précision requise est grande, plus le modèle mathématique est complexe.

### **2.1.3- Le « Path loss » ou la dispersion de puissance**

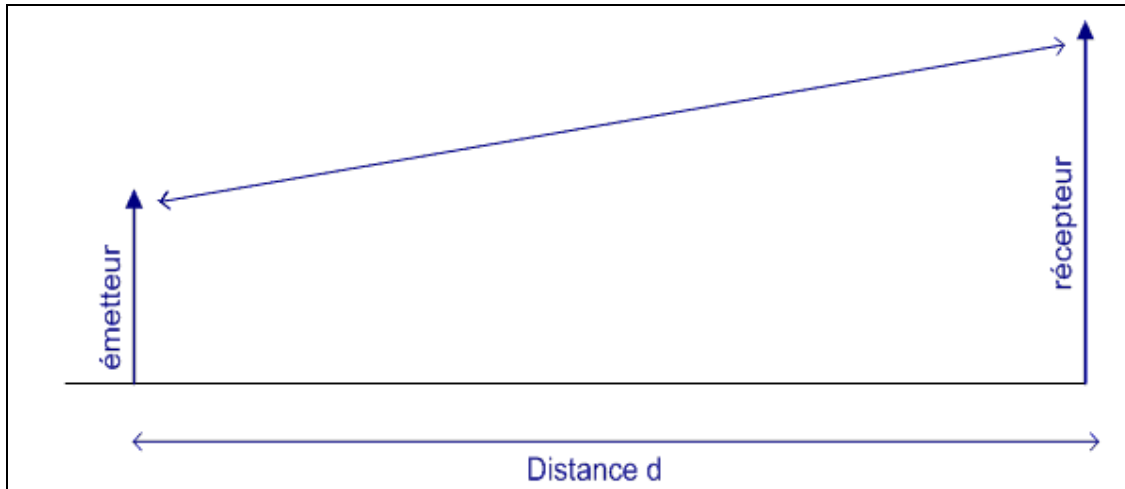
Le « path loss » caractérise l'affaiblissement que subit une onde électromagnétique lorsqu'elle parcourt une distance. Cet affaiblissement est dû à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés sur le chemin de chaque composante du signal reçu : bâtiments, montagnes et autres bloquant le signal. Dans notre cas, il s'agit principalement de machines de production.

Théoriquement, il est possible d'imaginer calculer cet affaiblissement de manière « exacte », mais cela suppose de connaître parfaitement la géométrie du lieu de parcours et la nature précise des milieux traversés ou rencontrés (propriétés électromagnétiques, état de surface,...), ce qui n'est généralement pas faisable. Dès que la mobilité est introduite pour les entités communicantes ou pour une partie de l'environnement, ce calcul exact devient impossible. Il faut donc avoir recours à des modèles qui sont expliqués dans le paragraphe suivant.

### **2.1.4- Les principaux types de modèles de propagation**

#### **2.1.4.1- Le Free space model ou le modèle de Friis**

Ce modèle considère qu'il n'existe qu'un seul chemin de propagation entre l'émetteur et le récepteur et que ce dernier est en vue directe [Fri46] (Figure II.1).



**Figure II. 1 : Modèle de base de propagation radio.**

L'équation utilisée pour calculer la puissance du signal reçu en environnement libre à une distance  $d$  de l'émetteur est la suivante :

$$Pr( d ) = \frac{PtGtGr}{(4\pi d)^2} \frac{\lambda^2}{L} \quad (2.1)$$

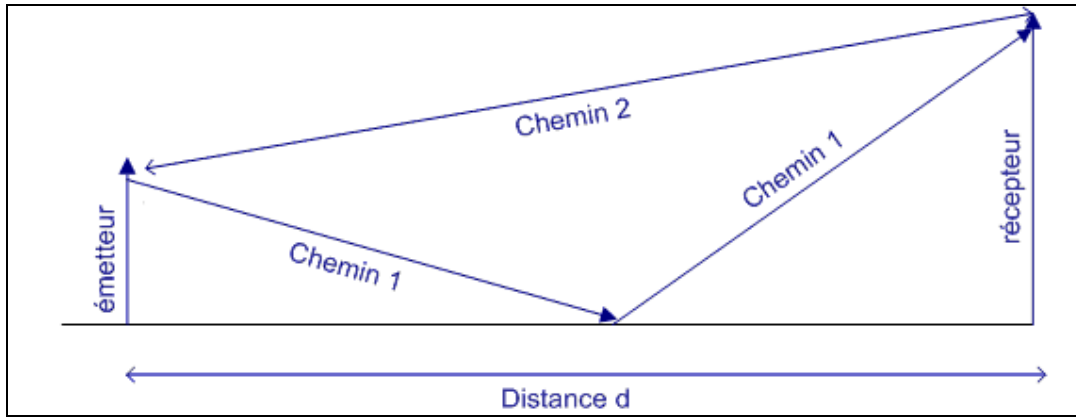
Où  $P_t$  est la puissance d'émission,  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains respectifs de l'antenne émettrice et de l'antenne réceptrice,  $L$  est la perte du système et  $\lambda$  est la longueur d'onde.

Un modèle de propagation permet de délimiter les zones de communication (l'ensemble des points assurant une bonne réception). Leur limite est souvent associée à un cercle autour de l'émetteur. Les points de l'espace correspondant à une bonne réception sont contenus dans un volume défini par les lobes des antennes utilisées. La partie intéressante pour nous est l'intersection de ce volume avec la surface sur laquelle les entités communicantes se déplacent. Si les antennes sont supposées isotropes et si les mobiles se déplacent dans un plan orthogonal par rapport à l'axe des antennes, la zone de communication est bien la surface à l'intérieur d'un cercle autour de l'émetteur.

Pour ce modèle un peu simpliste, si un récepteur est dans ce cercle, il reçoit une puissance suffisante pour décoder tous les paquets émis par l'émetteur, s'il est en dehors, il n'en reçoit aucun.

#### **2.1.4.2- Le « Two-ray ground reflection model » ou le modèle à deux rayons**

En environnement réel, il est en fait peu probable que le seul chemin de propagation soit le chemin direct. Le modèle two-ray ground considère à la fois le chemin direct et une réflexion sur le sol [Rap96].



**Figure II. 2: Two-ray ground reflection model.**

Ce modèle donne des résultats plus justes que le modèle de propagation en espace libre quand la distance  $d$  est suffisamment grande par rapport à la hauteur des antennes. Un seuil de distance  $D_c$  est associé à ce modèle au delà de ce seuil (si  $d > D_c$ ), la puissance reçue est calculée de la manière suivante :

$$\Pr(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2.2)$$

Où  $h_t$  et  $h_r$  sont les hauteurs des antennes d'émission et de réception.

L'équation précédente présente une décroissance de la puissance reçue en fonction de la distance, plus rapide que pour l'équation précédente. Cependant, pour des distances courtes, le modèle à deux rayons ne donne pas de bons résultats. Dans ce cas particulier, quand  $d$  est suffisamment petit ( $d < D_c$ ), c'est le modèle de propagation en espace libre qui doit être utilisé.

En rapprochant les deux modèles présentés, apparaît le besoin de déterminer précisément le seuil  $D_c$  qui va déterminer à quel moment il faut passer d'un modèle à l'autre.

A la distance seuil  $D_c$ , les deux équations doivent donner les mêmes résultats, ainsi  $D_c$  peut donc être calculé de la manière suivante :

$$D_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (2.3)$$

#### 2.1.4.3- Le « Shadowing model » [Rap96]

Les modèles de propagation en espace libre ou utilisant deux rayons calculent de manière déterministe la puissance reçue en fonction de la distance. Ils délimitent tous deux la zone de communication comme un cercle idéal. Dans la réalité, la puissance reçue à une certaine distance varie de manière complexe, à cause des effets de la propagation par chemins

multiples. En fait, les deux modèles précédents calculent la puissance moyenne reçue à une distance  $d$ . Le shadowing model est composé de deux parties [Rap96].

La première est le modèle d'atténuation en fonction de la distance, qui calcule la puissance moyenne reçue à une distance  $d$ , notée  $P_r(d)$  en utilisant une distance courte comme référence, notée  $d_0$ .  $P_r(d)$  peut être exprimée relativement à  $P_r(d_0)$  de la manière suivante :

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (2.4)$$

$\beta$  est appelé l'exposant ou le coefficient d'atténuation en fonction de la distance, et il est généralement déterminé de façon empirique par des mesures en environnement réel. D'après la première équation, nous savons qu'en espace libre  $\beta = 2$ . Le tableau suivant donne quelques valeurs typiques de  $\beta$ .

Environnement		$\beta$
En extérieur	Espace libre	2
	Zone urbaine obstruée	2.7 à 5
En intérieur	En ligne de vue	1.6 à 1.8
	Obstrué	4 à 6

**Tableau II.1 : Valeurs de  $\beta$  [Oba98].**

Les grandes valeurs correspondent à une obstruction plus forte et donc à une décroissance plus rapide de la puissance reçue en fonction de la distance.

$P_r(d_0)$  peut être calculée à partir de la première équation, en prenant par exemple  $d_0 = 1$  mètre.

L'atténuation en fonction de la distance est souvent mesurée en dB. Nous avons ainsi :

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)}\right]_{db} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.5)$$

La seconde partie du modèle shadowing reflète les variations de la puissance reçue à une distance donnée. C'est une variable suivant une loi log-normale, c'est-à-dire dont la distribution mesurée en dB est gaussienne. L'ensemble du modèle shadowing est représenté par :

$$\left[\frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_0)}\right]_{db} = -10\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{db} \quad (2.6)$$

Où  $X_{dB}$  est la variable aléatoire gaussienne dont la moyenne est zéro et l'écart type  $\sigma_{dB}$  où  $\sigma_{dB}$  est appelé « shadowing deviation ». Ce facteur peut également être obtenu par des mesures en environnement réel. Le tableau suivant donne quelques valeurs typiques pour  $\sigma_{dB}$ . Cette équation est aussi connue sous le nom de « log-normal shadowing model ».

Environnement	$\sigma_{dB}$
En extérieur	4 à 12
Bureaux, séparation légère	7
Bureaux, murs	9.6
Usine, en ligne de vue	3 à 6
Usine, obstruée	6.8

**Tableau II.2 : Valeurs de « shadowing deviation » [Oba98].**

Le « shadowing model » étend le cercle idéal de communication à un modèle statistique plus riche. Les entités communicantes ne peuvent communiquer qu'avec une certaine probabilité lorsqu'elles sont proches de la limite de portée.

Les modèles de propagation qui viennent d'être décrits sont les principaux modèles proposés par les outils de simulation.

#### **2.1.4.4- Recommandation ITU-R P.1238-4**

Au cours du travail bibliographique que nous avons réalisé sur les façons de modéliser les conditions de propagation, il nous a semblé particulièrement intéressant de se servir du document : « Recommandation ITU-R P.1238-4 » comme d'un guide [Itu05]. C'est une référence qui colle exactement à ce que nous sommes en train de faire puisqu'il traite de : « Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz ».

Dans ce document, on ne trouve pas exactement la bande des 2,4 GHz car il s'agit d'une bande ISM qui ne semble pas intéresser les organismes qui ont produit cet article. Nous nous référons donc aux chiffres donnés pour 2 GHz. Il n'y a pas non plus de site industriel en temps que tel. Il est vrai que les conditions de propagation vont varier d'un site à un autre, il nous faut donc essayer de choisir « une sorte de site moyen ».

Pour l'atténuation (dispersion de puissance) la formule donnée est de la forme :

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f (\text{nb. étage}) - 28 + \sigma \text{ dB} \quad (2.7)$$

Avec :

N : Coefficient d'atténuation.

f : fréquence en MHz.

d : Distance (m).

$L_f$  : Facteur d'atténuation

nb. étage : Nombre d'étages.

$\sigma$  : écart type.

### Principales caractéristiques du modèle ITU

**a- Coefficient d'atténuation (N):** Il est dépendant du milieu. La forme de l'atténuation donnée dans la littérature est [Itu05]:

$$L = -10 \log_{10} (d_{ref}/d)^n \quad (2.8)$$

Cela fait :

$$L = - (10 n \log_{10} (d_{ref}) - 10 n \log_{10} (d)) \quad (2.9)$$

Pour ces deux représentations de l'atténuation (2.7) et (2.9), n et N diffèrent d'un facteur 10, ainsi en « Free space » n vaut 2 et N vaut 20.

### **b- Distance (d)**

C'est la distance séparant les deux entités communicantes dans notre cas la station de base de la station mobile ou deux stations mobiles ( $d > 1$  m).

### **c- $L_f$ (nb étage)**

Ce facteur dans la formulation (2.7) de l'atténuation est à prendre en compte si les deux entités communicantes, la station de base et la station mobile par exemple, ne sont pas au même étage. Il est lui même dépendant du nombre d'étages (nb. étage) que doit traverser le signal et est exprimé en dB.

### **d- Ecart type ( $\sigma$ )**

C'est une composante aléatoire qui permet de prendre en compte un comportement statistique sans avoir à modéliser plus finement les phénomènes de propagation, par une technique de lancer de rayons, par exemple.

Cette composante aléatoire est caractérisée principalement par sa valeur moyenne et son écart type, plus cet écart type sera grand, plus on considérera que le milieu s'écarte d'un modèle en  $1/d^n$ . Si cette moyenne n'est pas nulle, il suffit de modifier la constante (-28 dB) dans l'équation 2.7.

Dans le document ITU [Itu05], on trouve aussi des indications à ce niveau : sur la loi à utiliser pour générer cette dispersion (Log-Normal) ainsi que sa valeur moyenne et son écart type.

## 2.2- Définition de l'effet capture

La décroissance de la puissance reçue en fonction de la distance parcourue par le signal crée un problème particulier lorsqu'un récepteur reçoit plusieurs signaux provenant d'émetteurs situés à des distances différentes. Ce problème, connu sous le nom « effet d'aveuglement », entraîne la perte ou le masquage d'un signal émis par une entité plus lointaine par rapport à celle qui est plus proche du récepteur. Néanmoins, ce phénomène ne se traduit pas toujours par une véritable collision qui provoque la perte de toutes les trames en conflit.

Supposons qu'une station reçoive deux transmissions simultanées (toutes les deux ayant un niveau de puissance au-dessus du seuil de réception). Si le récepteur est en mesure de choisir (de se synchroniser sur) et de comprendre le signal reçu avec la plus forte puissance, on parle alors d'effet de capture. Cet effet peut être constaté notamment quand la modulation de fréquence utilisée par la couche physique de 802.11 et de 802.11b est de type DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [Ahm99] [Met76] [Mut89] [Ger91].

Différents travaux [Lau92] [Vas04] [Che98] [War01] étudient des modèles analytiques et des simulations afin de caractériser l'effet de capture. Parmi les résultats de ces travaux, on peut retenir le modèle le plus simple mais le plus utilisé. Dans ce modèle, le récepteur capture le signal d'une transmission particulière si sa puissance de réception  $P_r$  est supérieure à  $\alpha$  fois la somme des autres puissances  $P_i$  des  $n$  autres transmissions simultanées,  $\alpha$  représentant un seuil appelé seuil de capture.

$$P_r = \alpha \sum_{i=1, i \neq r}^n P_i \quad (2.10)$$

Lors d'émissions concurrentes à un même instant, l'avantage est donc donné à l'émetteur dont le signal est le plus puissant à son arrivée au récepteur. Un tel mécanisme nécessite la prise en compte du critère d'équité pour l'accès au médium qui est remise en cause. Plusieurs modèles de cet effet de capture sont discutés dans [Vel03].

## 2.3- Identification des paramètres clés

Pour bien comprendre le travail que nous avons fait et qui est décrit dans les prochains chapitres, il faut bien définir quelques paramètres clés.



### **2.3.1- Débit**

Unité mesurant la vitesse de transmission des données sur une voie de communication. Pour une liaison numérique, il s'agit du nombre de bits transférés en un temps donné. Le débit s'exprime donc généralement en bits par seconde (bps) [Sta01].

### **2.3.2- Latence**

Dans diverses circonstances, on parle également de latence ou de temps de latence pour désigner le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction, à savoir un retard.

En informatique et plus spécifiquement pour les réseaux informatiques, la latence désigne le délai entre le moment où une information est envoyée et celui où elle est reçue. Il peut s'agir, par exemple, du temps qui sépare l'instant auquel un paquet est confié à la couche MAC de l'émetteur de l'instant pour lequel ce paquet est délivré par la couche MAC du récepteur. Le concept de temps de latence est employé comme synonyme de délai. Il peut être estimé quelque fois à l'aide d'une commande appelée « ping » (à noter qu'une commande de type ping mesure un aller-retour).

### **2.3.3- Gigue**

Il s'agit de la variation du délai de transfert de l'information donc de la latence. C'est un paramètre de qualité de service très important pour les applications communicantes de type voix ou vidéo où la gigue doit être la plus faible possible. Pour les grands réseaux (WAN Wide Area Network) la gigue est due principalement aux délais de transferts variables dans les nœuds du réseau (switches et routeurs). Dans notre domaine applicatif la gigue doit être minimisée pour satisfaire aux contraintes temps réel.

## **2.4- Différents Types d'Echanges**

Outre le contrôle de l'accès au réseau, la couche MAC est aussi responsable de l'ordonnancement du transfert des données sur le réseau. Pour ce faire, elle s'occupe de l'adressage, de la définition et du contrôle des trames.

Pour faire le lien entre la couche MAC et la couche réseau, l'IEEE a émis un standard (une sous-couche de la couche Liaison) nommé LLC (Logical Link Control).

Les échanges d'information sur un réseau peuvent se faire :

- soit entre deux stations si l'émetteur destine l'information émise à un récepteur unique ;
- soit entre une station et toutes les autres, il s'agit de la diffusion générale ;
- soit entre une station et un groupe particulier de stations, il s'agit de la diffusion par groupe ou par classe.

Une station a généralement une adresse propre unique, elle peut avoir une ou plusieurs adresses marquant son appartenance à une ou plusieurs classes de diffusion, elle est aussi concernée par tout message portant une adresse de diffusion générale.

Ces trois nuances dans l'adressage de l'information sont respectivement associées aux termes anglais : Unicast, broadcast et multicast.

#### **2.4.1 - Unicast**

Le terme unicast définit une connexion (réseau ou liaison) point à point. On entend par unicast le fait de communiquer entre deux stations identifiées chacune par une adresse (réseau ou de niveau 2) unique. Les paquets de données sont échangés sur le réseau suivant l'adresse du destinataire encapsulée dans la trame transmise. Normalement, seul le destinataire intercepte et décode le paquet qui lui est adressé [Mal02].

#### **2.4.2- Multicast**

Le multicast est une technique permettant de transmettre simultanément un paquet de données vers un groupe de récepteurs appelé groupe multicast. Cette technique est différente de l'unicast "une station vers une autre" et du broadcast "une station vers toutes les autres" puisqu'elle est considérée comme une transmission de "un à plusieurs". Durant ces dernières années, cette technique a pris une grande importance dans la communauté réseau et elle est maintenant très utilisée dans des applications telles que la téléconférence, les jeux distribués, etc. [Cha04] [Tia03].

A l'origine, les protocoles multicast ont été conçus pour les réseaux filaires. Avec l'arrivée des réseaux sans fil, une adaptation de ces protocoles était nécessaire. Cela a suscité beaucoup de recherches sur les protocoles multicast notamment pour la gestion de la mobilité des entités communicantes.

L'énorme avantage du multicast est de permettre l'envoi d'un même message à plusieurs destinataires, évitant ainsi la surcharge et la pollution du réseau. Ainsi, cette technique minimise la charge du réseau, la charge du serveur et enfin elle prévient la congestion du réseau. Mais le problème de multicast est qu'il rend la gestion des acquittements des destinataires très complexe, c'est pourquoi les protocoles assurant le multicast diffusent généralement l'information à une classe de destinataires sans acquittement.

Dans les réseaux sans fil, le multicast sera plus compliqué que pour les réseaux filaires, à cause du médium (méthodes d'accès, complexité des mécanismes de propagation, problèmes des terminaux cachées, mobilité etc.), les chances que tous les destinataires d'une même classe soient servis étant plus faibles.

La technique de multicast utilisée dans les réseaux Wi-Fi est similaire à celle utilisée dans les réseaux locaux filaires.

Dans les réseaux 802.11, l'adressage multicast comme dans la plupart des réseaux locaux, est souvent confié à la couche de niveau 3 du modèle OSI, il reste à la couche MAC à délivrer les trames. Dans ce cas, il y a une correspondance (mapping) d'adresse entre les adresses IP et les adresses MAC utilisées.

#### **2.4.3- Broadcast**

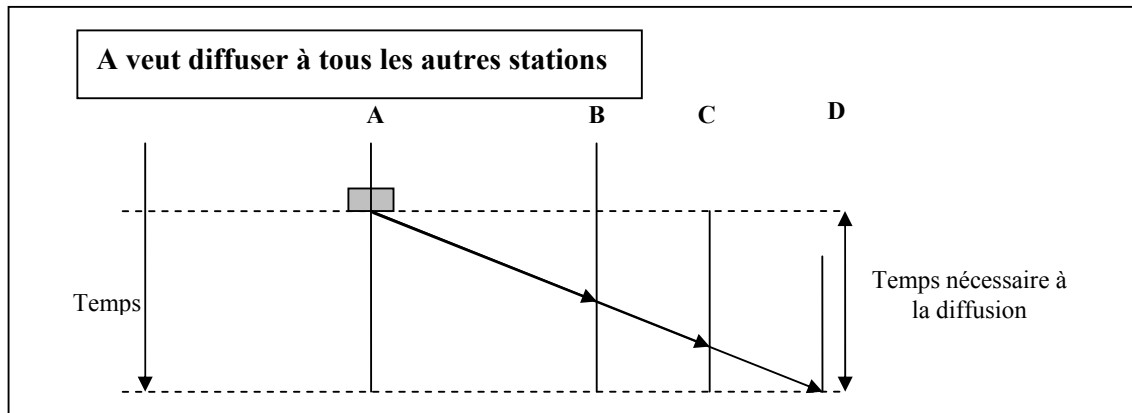
Le broadcast est un terme anglais définissant une diffusion de données depuis une source unique à l'ensemble des récepteurs. Le terme est utilisé en télécommunications, en informatique et en télévision [Mal02].

Les protocoles de communications (de niveau réseau ou de niveau liaison) prévoient une méthode simple pour diffuser des données (paquets ou trames) à plusieurs machines en même temps (broadcast). Au contraire d'une communication « Point à Point » (unicast), il est possible d'adresser des paquets ou des trames de données à un ensemble de machines d'un même réseau uniquement par des adresses spécifiques (adresses de diffusion générale) qui seront interceptées par toutes les machines du réseau ou sous-réseau.

Ce concept est fréquemment utilisé dans un réseau local pour transmettre des paquets à une machine dont on ne connaît pas l'adresse MAC (protocole ARP (Address Resolution Protocol) pour le protocole IP version 4) ou pour des annonces faites aux clients potentiels par des machines pouvant offrir des services.

L'étendue de la diffusion sera en fait restreinte au domaine de diffusion.

Dans une cellule d'un réseau sans fil avec infrastructure, la diffusion permet de transmettre simultanément une information à l'ensemble des stations. L'intérêt de cette technique est donc évident : si N stations appartiennent à une station de base, diffuser une trame prend beaucoup moins de temps que d'émettre successivement cette trame en point à point vers chacune des N stations. Dans le cadre applicatif que nous étudions avec de fortes contraintes temporelles, nous allons montrer que si le nombre de stations est relativement petit la diffusion peut se révéler plus lente que l'envoi à chacun des destinataires. Il s'agit d'une solution à explorer, malgré certains inconvénients qu'il nous faudra prendre en compte. L'absence d'accusé de réception implique qu'il n'est pas possible de savoir si la réception s'est correctement effectuée pour l'ensemble des destinataires. Le principe de la diffusion intracellulaire est illustré par la (Figure II.3). La station A émet une seule trame qui doit être réceptionnée par l'ensemble des stations de la cellule.



**Figure II. 3: Principe de la diffusion au sein d'une cellule.**

Dans un BSS (Base Station Subsystem), toutes les communications passent obligatoirement par le point d'accès. Lors d'une diffusion dans un BSS, la trame diffusée est dans un premier temps transmise au point d'accès et placée par celui-ci dans une file d'attente, elle n'est pas immédiatement envoyée vers les stations de la cellule. Pour que cette deuxième phase soit réalisée, il faut que toutes les stations soient en éveil. Dans un BSS, toutes les stations en économie d'énergie s'éveillent régulièrement pour réceptionner les « beacons ». C'est donc dans le « beacon » qu'est signalée la présence de trames en attente.

La fréquence des « beacons » conditionne donc le temps nécessaire à la réalisation de la diffusion.

#### **2.4.4- Problème de broadcast et de multicast dans les réseaux sans fil avec infrastructure fixe**

Le problème de broadcast et de multicast dans les réseaux sans fil avec infrastructure fixe est qu'à chaque fois qu'une diffusion générale ou par classe doit être faite, l'AP est obligé d'attendre le départ du prochain « beacon ». Cela augmente donc le délai de transmission entre les mobiles. La norme préconise le départ d'un « beacon » toutes les 100 ms [Std99].

L'idée d'augmenter la fréquence des « beacons » a été explorée par Patrick Lafarguette dans [Laf03] mais elle conduit à une augmentation de la charge offerte qui provoque rapidement des effets néfastes dus à la saturation du réseau.

Nous venons de voir que la diffusion était conditionnée par le départ des « beacons » ce qui avait un impact sur la latence. Pour mieux comprendre les caractéristiques temporelles d'un réseau sans fil avec infrastructure, il est temps d'aborder en détails le comportement de la couche MAC.

#### **2.5- Méthodes d'accès**

Le standard 802.11 [Std99] prévoyait initialement deux méthodes d'accès au canal de communication :

- Le Mode DCF ;
- Le Mode PCF.

### **2.5.1- DCF ou Distributed Coordination Function**

Le mode DCF s'appuie sur le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), combiné à l'algorithme de Back-off [Muh02][Mal02][Bou04]. CSMA/CA est proche du CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) d'Ethernet (IEEE 802.3), la différence est que la détection de collision (Collision Detection) est remplacée par l'évitement de collision (Collision Avoidance).

### **2.5.2- PCF ou Point Coordination Function**

Le mode PCF met en œuvre un accès de type réservation. Le contrôle est opéré par le point d'accès qui dispose alors de la fonction de coordination centralisée. Cette méthode est optionnelle contrairement à la méthode DCF et ne fonctionne qu'en mode infrastructure [Mal02].

Le point d'accès prend le contrôle du support et autorise ou non les stations à émettre. Il devient donc un Point Coordination (PC). Le PC détermine deux types d'intervalles de temps, avec ou sans contention :

- Contention Period (CP), qui correspond à un intervalle de temps avec contention durant lequel la méthode d'accès est le DCF.
- Contention Free Period (CFP), qui correspond à un intervalle de temps sans contention durant lequel la méthode d'accès est le PCF.

Les stations peuvent utiliser à la fois les algorithmes PCF et DCF. Les durées d'utilisation alternent dans le temps. La durée CFP-MaxDuration est définie par le point d'accès. Les périodes CFP s'initient lors de l'émission d'un beacon par le point d'accès. Pendant la durée CFP-MaxDuration, c'est la méthode d'accès PCF qui est activée. Le reste du temps c'est la méthode DCF.

Pour alterner les modes PCF et DCF, une supertrame est utilisée, elle permet de notifier le motif qui définit l'alternance entre le mode PCF et le mode DCF. Le début de cette supertrame est marqué par une trame beacon. Pour émettre ce beacon, c'est l'intertrame PIFS qui est utilisé.

### **2.5.3- Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA)**

Le CSMA/CD a été légèrement modifié pour aboutir au CSMA/CA, qui a pour but de prévenir au maximum les collisions. Ce dernier essaie de réduire le nombre de collisions en

évitant qu'elles se produisent, sachant que la plus grande probabilité d'avoir une collision est lors de l'accès au médium en raison de l'utilisation de CSMA.

Le CSMA/CA fait appel à différentes techniques, telles que :

- Un mécanisme d'écoute du médium ;
- L'algorithme de Back-off pour la gestion d'accès au médium ;
- Un mécanisme optionnel de réservation, dont le rôle est de limiter le nombre de collision en s'assurant que le médium est libre ;
- Un mécanisme d'acquiescement et de fragmentation des trames.

Pour comprendre l'algorithme du CSMA/CA, il faut connaître ce qu'est l'« Inter-Frame Spacing » (IFS). C'est un mécanisme d'espacement entre deux trames. Ce sont en fait des plages d'inactivité sur le support de transmission qui permettent de gérer l'accès au support pour les stations ainsi que d'instaurer un système de priorités lors d'une transmission. Ces plages d'inactivité sont définies à partir d'une granularité : un temps élémentaire appelé « time slot ».

Il existe quatre types d'IFS :

- Short Inter-Frame Spacing (SIFS) est le plus court des IFS. Il est utilisé pour séparer les différentes trames transmises au sein d'un même dialogue comme par exemple, entre des données et leur acquiescement ou entre différents fragments d'une même trame ou pour toute autre transmission relative à un même dialogue (question-réponse) ;
- DCF Inter-Frame Spacing (DIFS) est le temps que doivent attendre les autres stations avant d'émettre un paquet en mode DCF. La valeur du DIFS est égale à celle d'un SIFS augmentée de deux time slots ;
- PCF Inter-Frame Spacing (PIFS) est le temps que doit attendre les autres stations avant d'émettre une trame en mode PCF. La valeur est inférieure au DIFS, pour permettre de favoriser ce mode ;
- Extended Inter-Frame Spacing (EIFS) est une plage de temps utilisée à la suite de la réception d'une trame erronée. La valeur d'EIFS est plus grande que DIFS.

Dans CSMA/CA, le temporisateur est utilisé pour départager les stations voulant émettre en concurrence et est géré de la même manière que dans CSMA/CD. Ceci est décrit dans la figure II.4 [Man05][Goo88][Bou04].

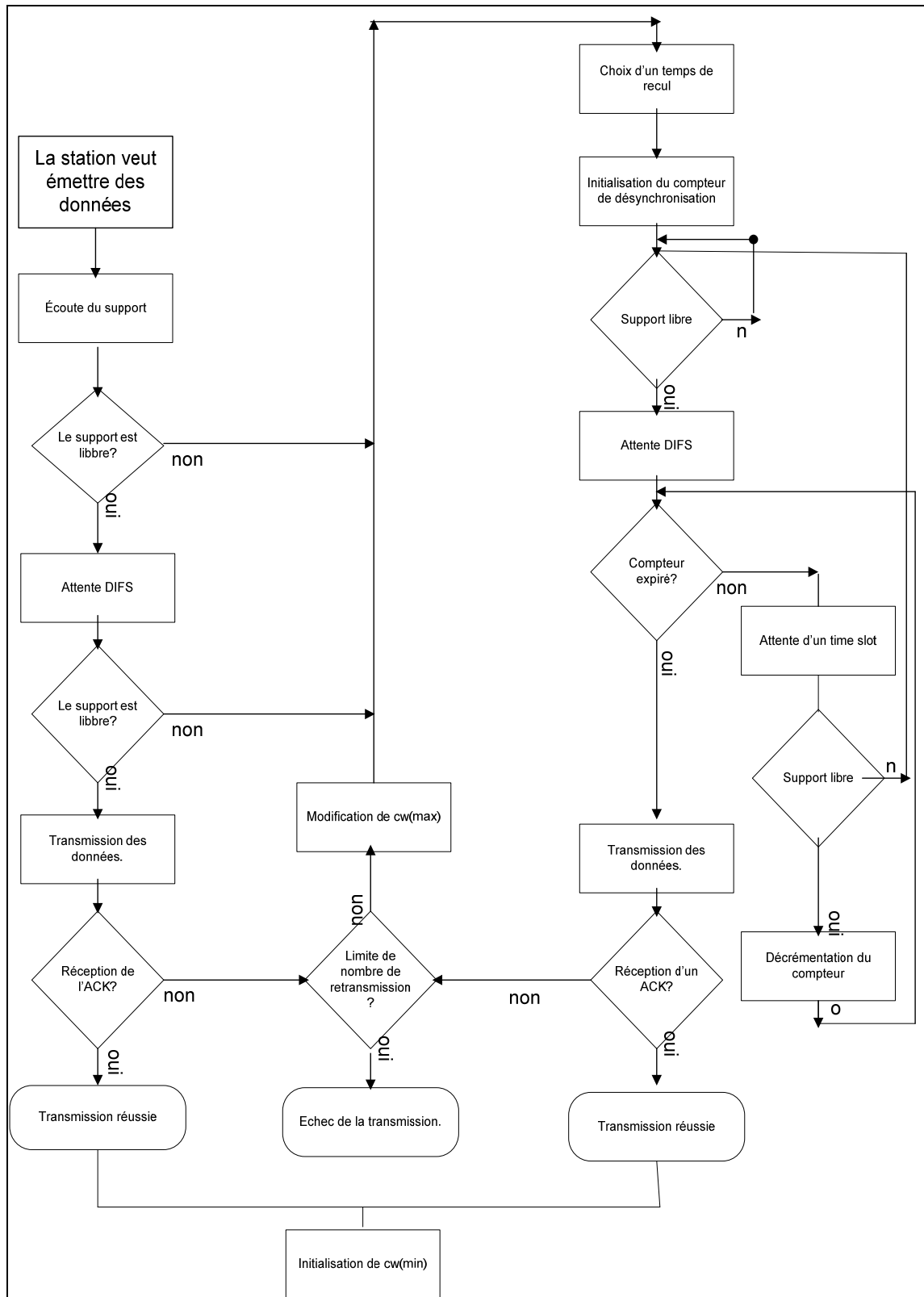


Figure II. 4: L'algorithme du Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) [Man05].

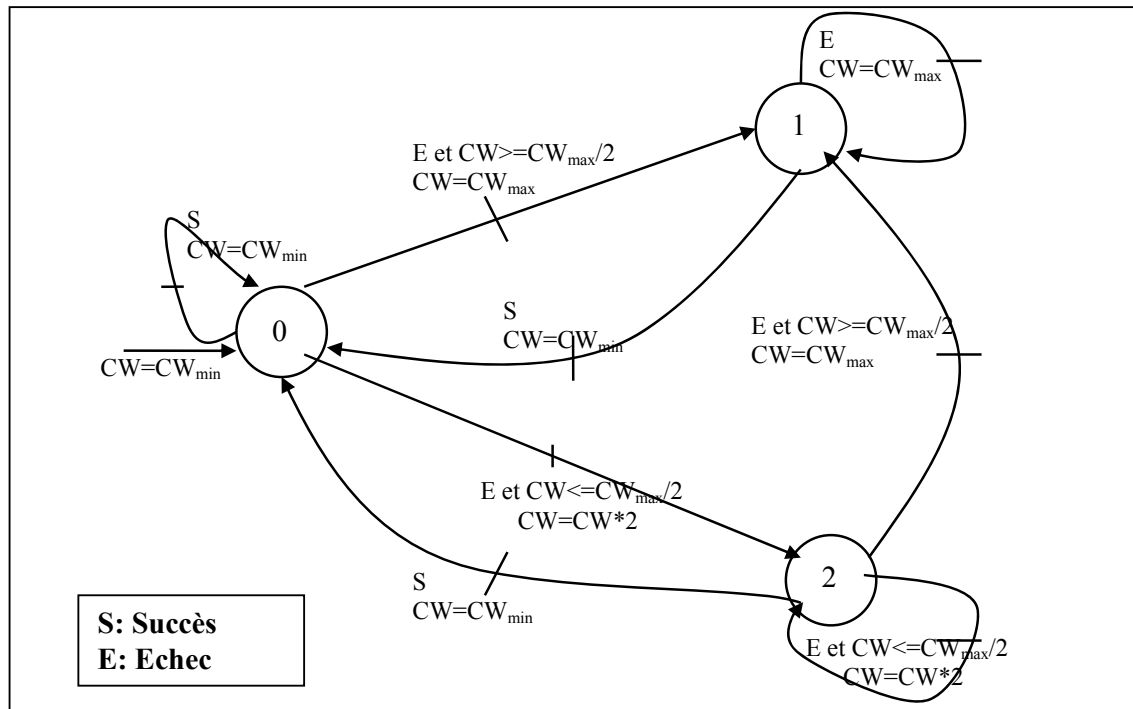
La seule chose qui change, c'est qu'une collision n'est pas détectée directement, mais elle est déduite du fait qu'un ACK n'a pas été reçu après l'émission d'une trame. CSMA/CA permet de tirer au sort un nombre aléatoire entre 0 et CW (Contention Window), où la valeur de CW croît exponentiellement par rapport au nombre de tentatives de transmission. Le nombre tiré au sort est multiplié par la longueur du time slot pour donner « un temps de recul ». La station devra attendre le temps correspondant au résultat de l'algorithme avant de refaire une nouvelle tentative de réémission sur le médium, tout en vérifiant que le support reste libre. Après un certain nombre d'échecs, on considère que l'émission a échoué.

Le principe de décrémentation et d'incrémentatation (Figure II.5) se fait de la façon suivante :

Dans le cas d'un succès de l'émission le CW revient à sa valeur initiale, c'est à dire  $CW_{min}$ , mais dans le cas contraire la taille de la fenêtre de contention (CW) double. A la  $i^{ème}$  retransmission, nous avons alors :

$$TBACKOFF(i) = \text{random}(0, CW_i) \times \text{Timeslot} \quad (2.11)$$

Avec  $CW_i = 2^i * CW_{min}$  où  $i$  représente le nombre d'échecs.



**Figure II. 5: Graphe de Mealy représentant le mécanisme de BEB.**

Ce graphe (Figure II.5) représente une machine de Mealy avec 3 états qui décrit l'évolution de la fenêtre de contention CW dans l'algorithme de Back-off standard. Une machine de Mealy est une machine à état dont les actions sont toutes attachées aux transitions.

Etat 0 représente l'état où CW est minimale (égale à  $CW_{min}$ ). Dans cet état :



- En cas de succès de transmission, on reste à l'état 0 avec  $CW = CW_{\min}$  ;
- En cas d'échec de transmission et si  $CW$  est inférieure à  $CW_{\max}/2$  on passe à l'état 2 en doublant la valeur de  $CW = CW * 2$ , sinon on passe à l'état 1 avec  $CW = CW_{\max}$ .

Etat 1 représente l'état où  $CW$  est maximale (égale à  $CW_{\max}$ ). Dans cet état :

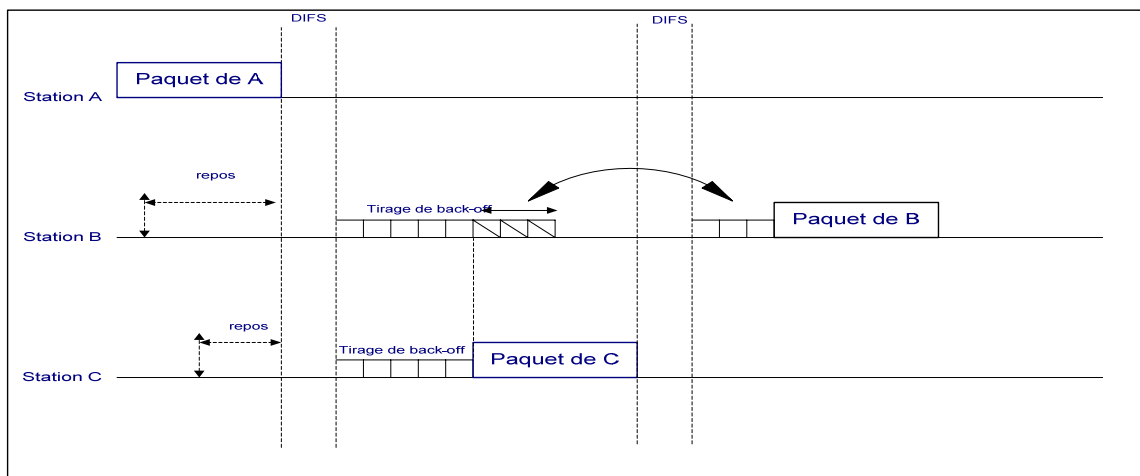
- En cas de succès de transmission, on revient directement à l'état 0 avec  $CW = CW_{\min}$  ;
- En cas d'échec de transmission, on reste à l'état 1 avec  $CW = CW_{\max}$ .

Etat 2 représente le cas où la valeur de  $CW$  est comprise entre  $CW_{\min}$  et  $CW_{\max}$  ( $CW_{\min} < CW < CW_{\max}$ ). Dans cet état :

- En cas de succès de transmission, on revient directement à l'état 0 avec  $CW = CW_{\min}$  ;
- En cas d'échec de transmission, si la valeur de  $CW$  est inférieure, on reste à l'état 2 en doublant la valeur de  $CW$ . Sinon, on passe à l'état 1 avec  $CW = CW_{\max}$ .

Il existe plusieurs façons pour représenter cet automate, mais nous avons choisi un graphe de type Mealy pour bien mettre en avant ce qui diffère entre le Back-off modifié (décrit dans le chapitre 3) et le mécanisme du BEB.

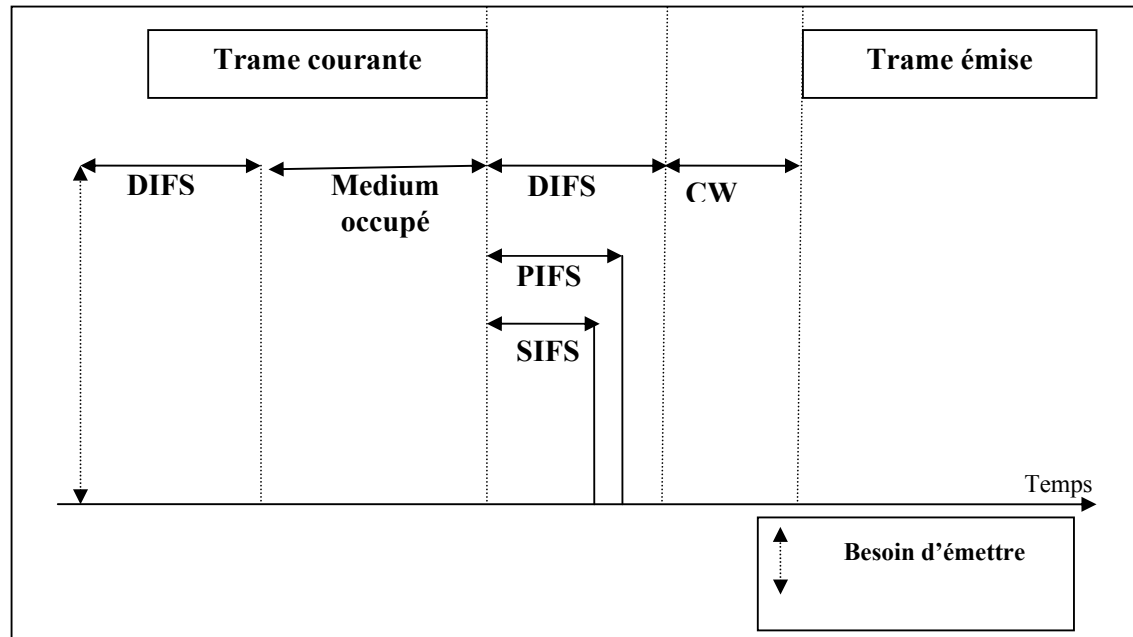
La figure II.6 présente comment se fait l'élection de la machine qui transmettra, lorsque plusieurs machines souhaitent transmettre dans un même temps dans le cas de CSMA/CA. La station A émet, et c'est alors que les stations B et C souhaitent émettre une trame. Elles écoutent le support, mais il est occupé, donc elles attendent qu'il se libère. Une fois le support libre, elles attendent le temps d'un DIFS (temps d'attente avant d'émettre une nouvelle trame de données) puis elles attendent chacune le temps calculé par leur exécution de l'algorithme du Back-off. La station C a tiré au sort un temps moins long, donc c'est elle qui émet avant la station B.



**Figure II. 6: Le système de retransmission CSMA/CA.**

Le temps restant à courir pour la station B sera repris après le respect d'un DIFS dès que le support sera de nouveau libre.

Sur le schéma suivant (figure II.7), il est possible de voir comment sont organisés les différents temporisateurs entrant en jeu pour différer l'émission. Le temporisateur EIFS n'est pas présent dans ce schéma, car il ne concerne pas notre exemple.



**Figure II. 7: Les différents temps inter-frames utilisés dans PCF et DCF.**

Le SIFS permet de favoriser l'acquittement des paquets dans la compétition pour l'accès au canal. Le temps d'attente avant de transmettre un acquittement est moins long que celui pour transmettre une trame. Par conséquent, l'envoi d'acquittement sera prioritaire par rapport à l'envoi d'une nouvelle trame.

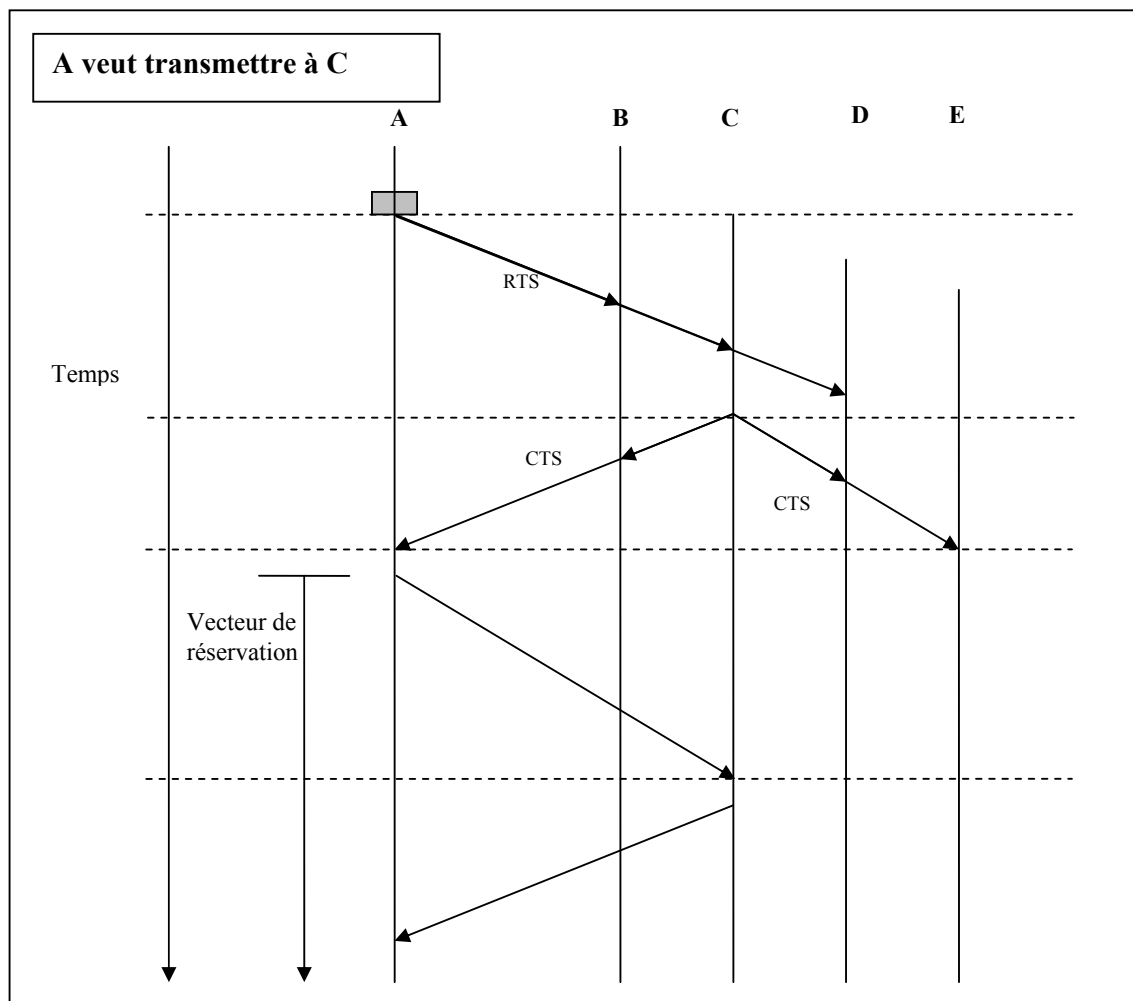
#### 2.5.4- Mécanisme RTS/CTS

Il existe aussi un mécanisme de réservation du canal qui est optionnel. C'est le « Virtual Carrier Sense » (VCS) (aussi connu sous l'appellation RTS/CTS) qui permet de réserver le support entre deux stations avant tout envoi de données. Ce mécanisme permet d'éviter le problème de la station cachée présenté dans la figure I.8.

Rappelons que ce problème simple correspond au cas suivant : soit trois stations : A, C et E. La station C est à portée des deux stations mais, A et E ne peuvent pas se voir, car hors de portée (Figure II.8). Lorsque A émet des données pour la station C, la station E peut très bien essayer de faire la même chose. En effet, lorsqu'elle écoute le support, elle n'entend rien,

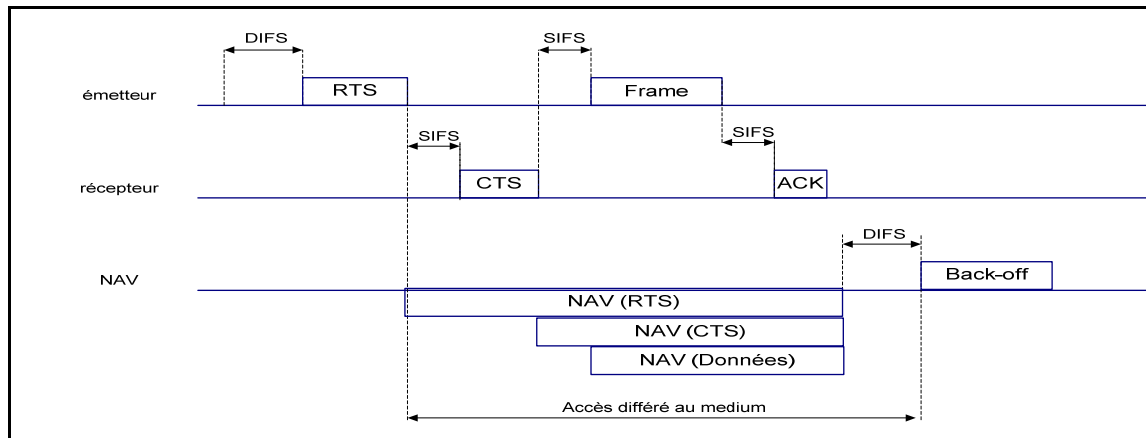
puisque la station est bien hors de sa portée. Ainsi, croyant le support libre, elle va émettre en risquant de brouiller la réception de la station C. On parle alors du problème du terminal caché.

C'est pour éviter ce problème, que l'algorithme du VCS entre en jeu. Lorsque A veut envoyer des données vers C, elle émet une requête « Request To Send » (RTS) qui est reçue par l'ensemble des stations qui sont à sa portée. Cette requête contient la source, le destinataire et la durée estimée de la transaction. Dès que le destinataire C reçoit cette requête, elle émet un « Clear To Send » (CTS) si elle est prête et que le support est libre. Comme le montre le schéma II.8, la station E ne reçoit que le CTS. Cependant, le CTS porte les mêmes informations que le RTS. La station E ne transmettra alors pas pendant l'intervalle de temps spécifié dans le CTS. Ce mécanisme permet donc de réserver le support auprès de toutes les stations à portée des deux stations voulant communiquer.



**Figure II. 8: Le mécanisme du virtual Carrier Sense (VCS).**

Dans le schéma II.9, on voit par quel mécanisme se met en place le VCS. Cela permet ainsi à la source d'émettre sa trame en évitant les collisions. Toutes les stations à portée des deux stations qui communiquent, attendent que la source ait émis sa trame et que le destinataire l'ait acquittée.



**Figure II. 9: Le mécanisme VCS et les temps inter-frame [Bou04].**

### 2.5.5- Evaluation de CSMA/CA

Il est admis [Car03][Bia96] que ce mode d'accès au médium à compétition offre des performances acceptables pour un réseau faiblement chargé et pour des applications ne nécessitant pas des réponses en temps critiques comme le sont les applications de bureautique. Dans le monde industriel, les exigences auxquelles doivent répondre un réseau, et dans le cas qui nous concerne un réseau sans fil, sont plus pointues. Un tel réseau doit notamment pouvoir supporter du trafic temps réel. Pour les applications industrielles représentées par notre application générique, les performances attendues d'un réseau sans fil vont donc présenter certaines particularités. Deux paramètres doivent être pris en compte :

- le débit ;
- le délai d'accès au médium qui impacte sur la latence du réseau.

Une étude bibliographique a été réalisée pour faire le point sur le comportement de CSMA/CA soumis à un trafic de nature temps réel. Avant de faire la synthèse des résultats obtenus il nous faut définir les paramètres manipulés dans ces évaluations (débit : throughput, charge offerte : offered load, temps d'accès au médium : access delay,...) et présenter les différentes méthodes utilisées pour exprimer les évolutions et les interdépendances de ces paramètres (simulation, approche analytique, tests,...). Il faudra ensuite pour chaque résultat présenté, préciser les hypothèses attachées à cette évaluation : nombre de stations, fenêtre d'évolution de tel ou tel paramètre.

### 2.5.5.1- Définition des paramètres

**1- La charge offerte (offered load) G :** c'est le volume total de données soumis au réseau pour être transmises, par unité de temps [Sta01][Mis05]. Il représente la quantité des données transmise avec succès plus le nombre de trames retransmises par unité de temps. Un débit s'exprime donc en bits par seconde (bps) ou à l'aide d'un de ses multiples (Kbps, Mbps, Gbps, ...). Pour être plus facilement interprétées et comparées, les unités traitant des différentes formes de débit sont normalisées et exprimées par rapport à la capacité du réseau. Par exemple, si pendant 1 s, la charge soumise au réseau par l'ensemble des stations est de 1 Mbps sur un canal de capacité 10 Mbps, alors dans ce cas la charge offerte G sera de 0,1.

**2- le temps de transit D :** le temps de transit désigne le délai entre le moment où une information est envoyée et celui où elle est reçue. Les temps de départ et d'arrivée ( $T_{\text{émission}}$  et  $T_{\text{rec}}$ ) sont à prendre à un même niveau protocolaire : couche physique, au dessus de la couche MAC, ... [Bou04]. Alors  $T_{\text{transit}}$  peut être exprimé par :

$$T_{\text{transit}} = T_{\text{rec}} - T_{\text{émission}}. \quad (2.12)$$

Avec :  $T_{\text{rec}}$  : temps de réception de la trame par le récepteur.

$T_{\text{émission}}$  : temps d'émission de la trame.

**3- Le débit utile S (throughput):** Dans la transmission de données, le 'throughput' ou S est la quantité de données transmises avec succès par unité de temps. Comme G, le paramètre S est souvent normalisé et exprimé comme fraction de la capacité du réseau.

Les comportements de S et de D sont généralement tracés en fonction de la charge offerte G. On peut noter que S et G diffèrent. S est le taux de trames de données transmis avec succès. G est le nombre total de trames offertes au réseau.

On peut dire que :

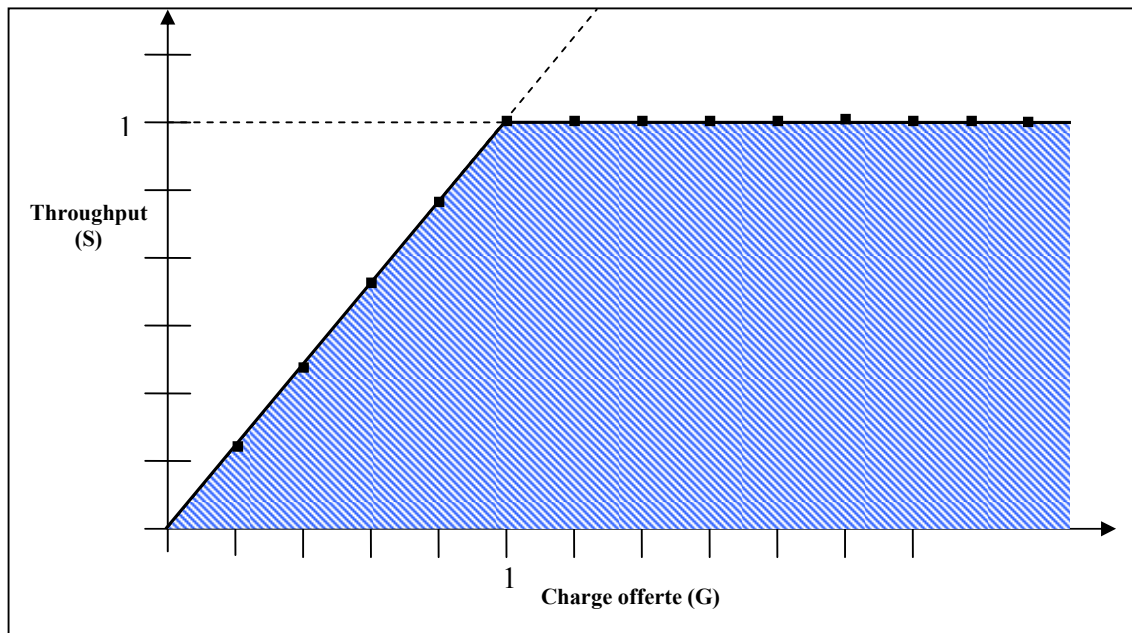
$$G = S + (\text{nombre de trames à retransmettre par unité de temps}). \quad (2.13)$$

Dans notre domaine d'étude, une trame doit être retransmise si elle a subi une collision, ce qui peut s'exprimer par  $G \cdot Pr$  [une trame subit une collision],  $Pr$  étant une probabilité.

S devrait augmenter avec G, mais au delà d'un certain point de saturation, le réseau ne peut pas écouler plus de charge.

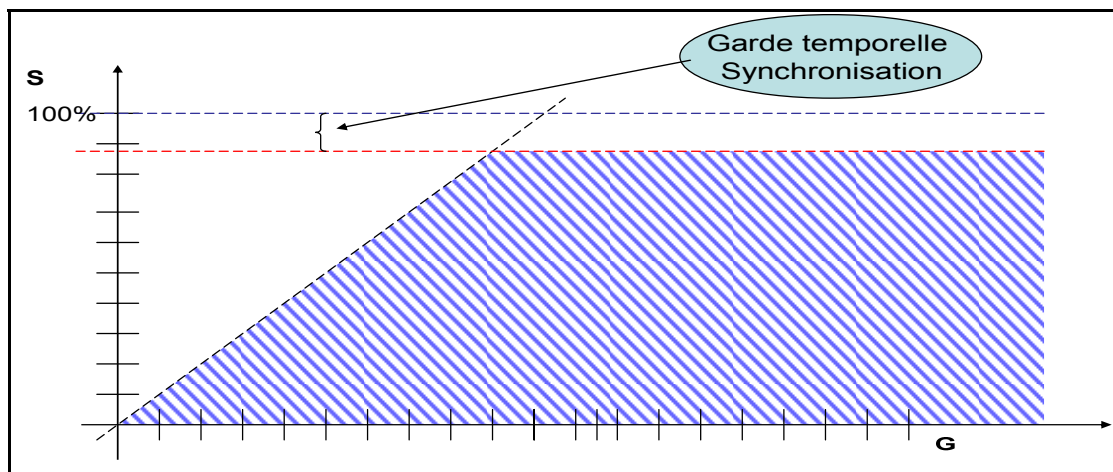
D est souvent exprimé en fonction de G, très généralement si G augmente le délai augmente aussi.

La figure II.10 montre la situation idéale pour  $S = f(G)$  : l'utilisation de canal augmente pour s'adapter à la charge offerte jusqu'à une capacité offerte égale à la « *full capacity* » du système. Au delà, si  $G$  continue à augmenter,  $S$  reste à 1. La courbe donnée en II.10 est en effet une asymptote de la courbe des performances réelles, la surface hachurée représente la zone dans laquelle la courbe  $S = f(G)$ . Nous allons progressivement essayer d'affiner cette surface.



**Figure II. 10:  $S = f(G)$  : Comportement théorique idéal.**

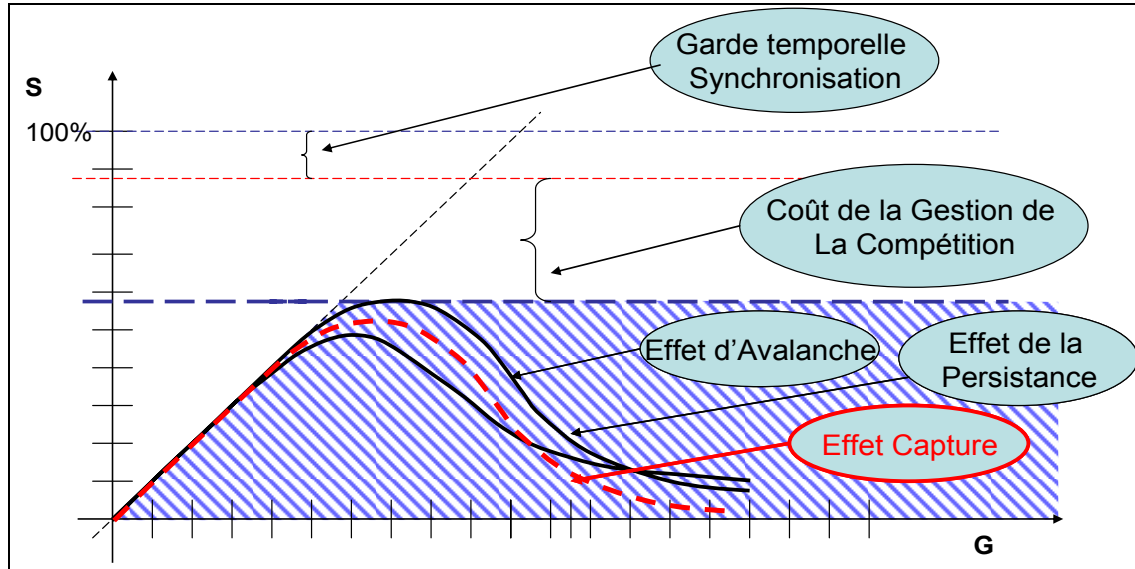
Il est impossible d'arriver à ce cas car il y a toujours une garde temporelle, chaque nouvelle trame émise doit être précédée par un préambule pour permettre la synchronisation comme le montre la figure suivante.



**Figure II. 11: Prise en compte de la synchronisation pour  $S = f(G)$  .**

Le médium ne peut pas être utilisé à 100% pour des raisons multiples, la plus évidente étant due au fait que CSMA/CA doit respecter des délais de type IFS entre les trames.

Dans les réseaux sans fil des phénomènes tels que la capture et le choix de certaines stratégies comme la persistance impactent sur l'allure de la courbe  $S = f(G)$  [Mis05] [Vas04] [Che98]



**Figure II. 12: Evaluation dans les réseaux sans fil [Mis05].**

#### 2.5.5.2- Etude des performances de CSMA/CA

Pour évaluer les performances de CSMA/CA, plusieurs approches peuvent être utilisées. La première est analytique. Cette approche consiste à mettre en équations les mécanismes de CSMA/CA. La deuxième est l'évaluation par simulation, dans ce cas plusieurs outils permettent de décrire assez facilement une solution réseau (sans fil dans notre cas), d'en obtenir un modèle généralement sous la forme d'un automate à états et, à partir de sondes, de récolter des résultats issus d'un processus de simulation. La dernière approche est l'évaluation par des tests, dans ce cas, il s'agit de procéder à des mesures dans un environnement donné en respectant un protocole expérimental bien défini.

##### **Evaluation par approche analytique**

Les méthodes analytiques font souvent appel aux chaînes de Markov et à la théorie du point fixe pour calculer les incidences des tirages au sort successifs.

##### **Cas d'un réseau Ad Hoc**

Les figures II.13, II.14 [Bia96] représentent les résultats d'évaluation de CSMA/CA obtenus par une étude analytique.

L'objectif de cette étude est de calculer les délais de transmission entre les stations dans un réseau Ad Hoc par rapport à la capacité du réseau et à la taille de la fenêtre de contention (CW).

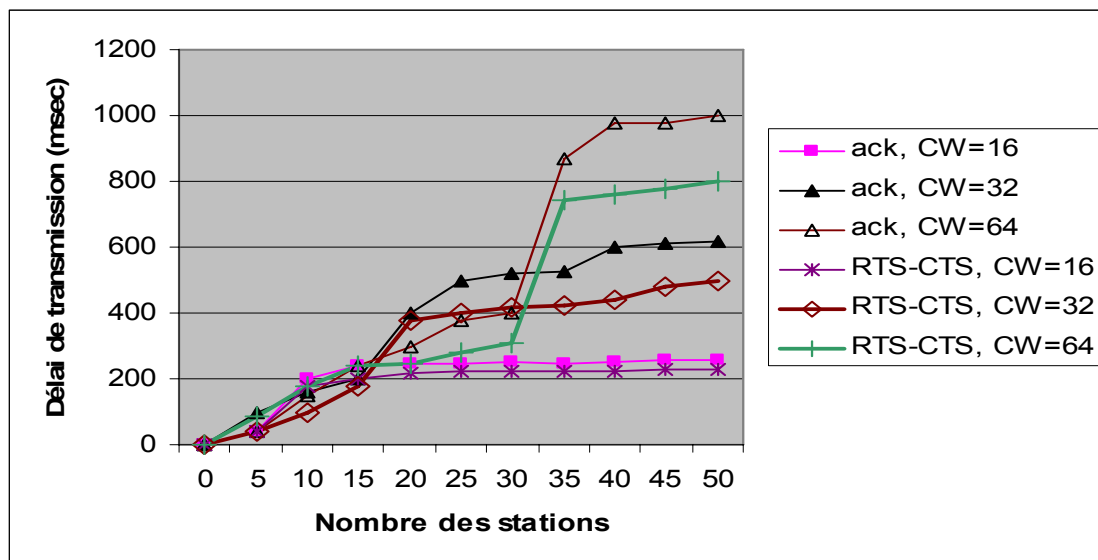
Dans cette étude, le nombre N de stations évoluant dans le réseau Ad hoc varie. A chaque calcul, il augmente de 5 stations. Les résultats de ces calculs permettent d'estimer le délai de transmission entre les stations.

Cette étude est basée sur des paramètres décrits dans le tableau II.3 suivant :

Taille de la trame	1023 Octets
Délai de propagation	1 $\mu$ s
Taille de slot	20 $\mu$ s
Taille du SIFS	1 $\mu$ s
Taille DIFS	50 $\mu$ s
Débit réseau	1, 5. 5 et 11 Mbps

**Tableau II.3: Paramètres de l'étude de [Bia96].**

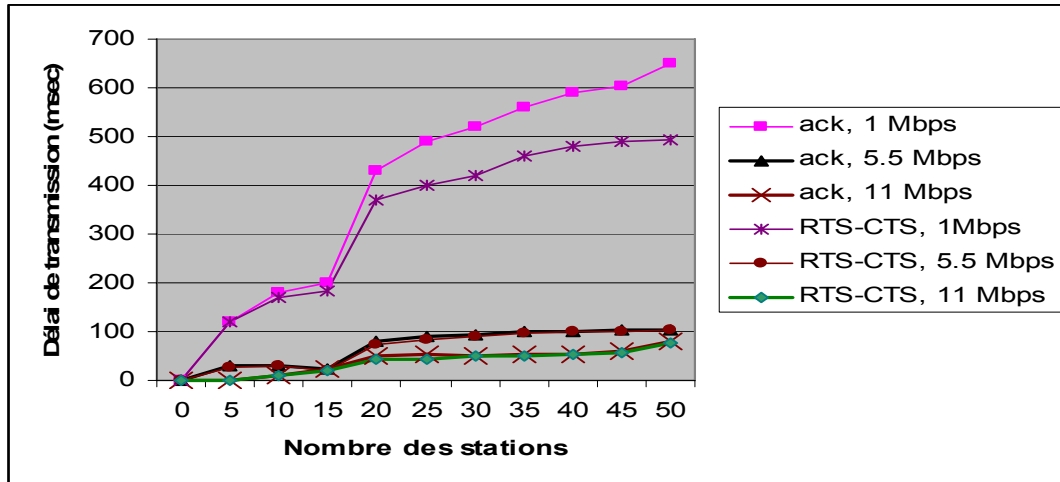
La figure II.13 [Bia96] montre l'influence du mécanisme RTS/CTS sur le délai de transmission par rapport au nombre des stations (mode Ad Hoc) pour plusieurs valeurs de la fenêtre de contention (CW). Nous remarquons ici que quand le nombre de stations augmente, cela induit que le nombre de collisions augmente. Le nombre de retransmissions sera donc plus grand, ce qui provoque une augmentation du délai de transmission entre les stations. L'utilisation de RTS/CTS diminue un peu ce délai et les performances sont plus favorables. Nous pouvons dire également que le délai de transmission est dépendant de la fenêtre de contention (CW) particulièrement à forte charge [Bia00].



**Figure II. 13: Délai par rapport au nombre de stations pour différentes valeurs de CW [Bia96]**

La figure II.14 montre l'effet de la capacité du réseau sur le délai des trames.





**Figure II. 14: Effet de la capacité du réseau sur le délai des trames [Bia 96]**

Dans le cas d'un réseau avec infrastructure, nous n'avons pas trouvé d'études qui évaluent ce mode de réseau d'une façon analytique.

### Evaluation par simulation

#### a- Cas d'un réseau Ad Hoc

L'objectif des simulations faites dans la bibliographie [Bia00] [Chu05][Car03][Buy05] est d'étudier les performances de CSMA/CA et surtout de calculer le throughput (débit utile)  $S$  et le délai d'accès  $D$  par rapport à la charge du réseau  $G$ . Les figures II.15, II.16 [Bia00][Chu05] montrent le throughput et le délai d'accès par rapport à la charge du réseau. Ces résultats ont été obtenus par des simulations faites à l'aide d'un simulateur dédié écrit en C++.

Le scénario utilisé pour ces simulations est le suivant :  $N$  est le nombre de stations qui se déplacent dans une cellule 802.11 et qui échangent entre elles un trafic qui suit la loi de Poisson. Dans cette simulation et à tout moment, tous les mobiles peuvent s'entendre les uns les autres.

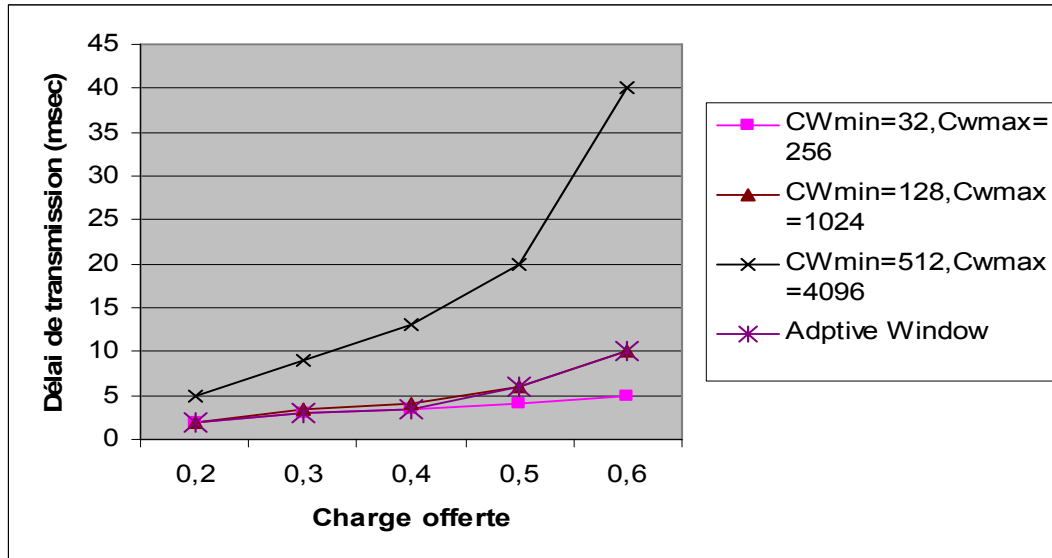
La charge offerte  $G$  et le throughput  $S$  sont normalisés en respectant la capacité du canal.

Les paramètres de cette simulation sont donnés dans le tableau suivant :

Taille de la trame	1 KOctets
ACK-timeout	300 $\mu$ s
Taille de slot	50 $\mu$ s
Taille du SIFS	28 $\mu$ s
Débit du réseau	1 Mbps

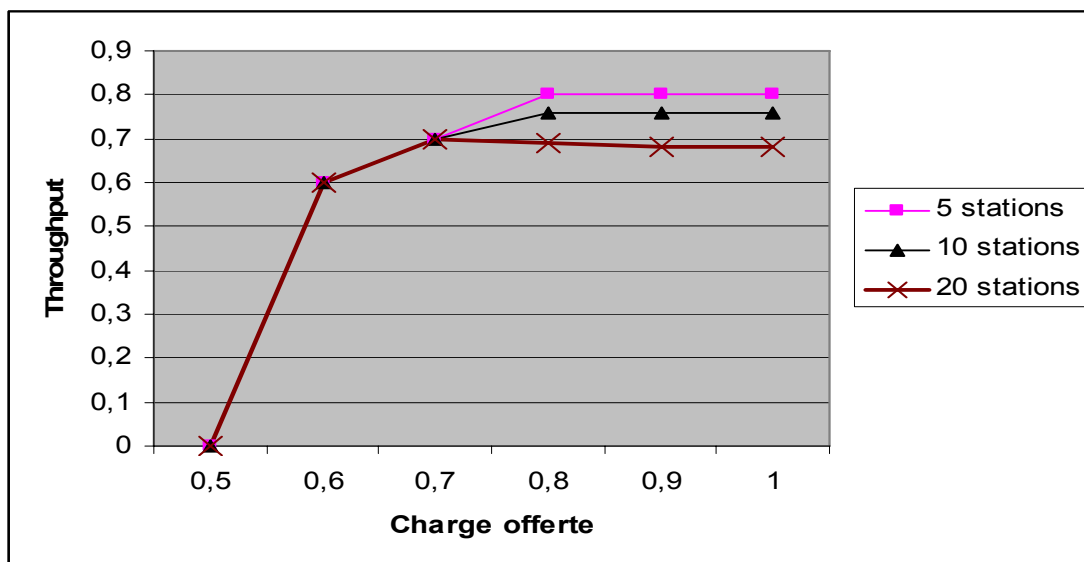
**Tableau II.4 : Paramètres de la simulation de [Bia00].**

La figure II.15 montre l'effet de la charge offerte et de la fenêtre de contention (CW) sur le délai d'accès. Les résultats de cette simulation donnés sur cette figure (Figure II.15) montrent que le délai d'accès a un comportement exponentiel par rapport à la charge offerte et est dépendent de la fenêtre de contention (CW) quand la charge offerte reste inférieure à 0,6.



**Figure II. 15: Délai d'accès par rapport à la charge offerte.**

La figure II.16 montre l'évolution du throughput S en fonction de la charge offerte G pour trois scénarios différents de réseau avec 5, 10 et 20 stations. Nous remarquons que quand la charge offerte augmente, le throughput atteint une valeur plateau de saturation qui dépend du nombre de stations impliquées pour la génération du trafic : plus le nombre de stations est grand, plus la saturation apparaît rapidement.



**Figure II. 16: Throughput S par rapport à la charge offerte G [Bia00].**

L'évolution du délai D en fonction de la charge du réseau est due à plusieurs paramètres. Nous allons nous intéresser spécialement au rôle de l'algorithme BEB à ce niveau.

#### **b- Cas d'un réseau avec infrastructure**

Dans [Kez05] une simulation pour mesurer les performances de CSMA/CA dans un réseau 802.11 avec infrastructure est faite avec le simulateur NS2.

Les paramètres de cette simulation sont décrits dans le tableau suivant :

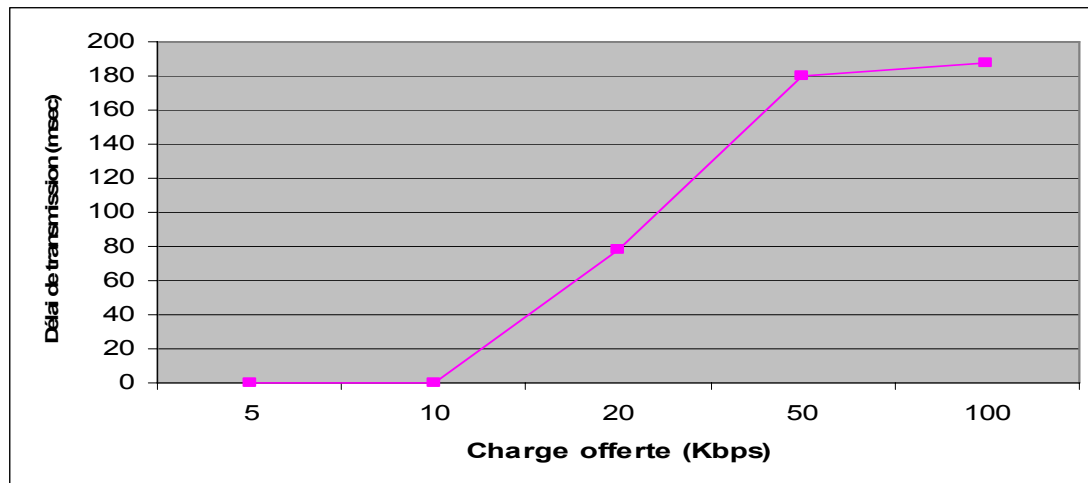
Taille de la trame	60 octets
Vitesse de transmission	11 Mbits/sec
Puissance de transmission	2W
Bande de fréquence	2.4 Ghz

**Tableau II.5 : Paramètres de la simulation [Kez05].**

Dans cette simulation, 10 stations parmi 20 agissent comme des sources de trafic, les 10 autres comme des récepteurs. Un flux UDP est établi pour chaque paire (source, destination). A chaque période et pour augmenter la charge du réseau, la fréquence d'envoi des trames entre les paires est augmentée.

L'objectif de cette simulation est de calculer le temps de transmission pour différentes charges du réseau.

La figure II.17 issue de [Kez05] montre le délai moyen de transmission par rapport à la charge du réseau 802.11 avec infrastructure.



**Figure II.17 : Délai moyen de transmission par rapport à la charge du réseau 802.11 avec infrastructure.**

Comme avec les résultats obtenus en utilisant le mode Ad-hoc (voir a), les résultats montrent, en utilisant la méthode CSMA/CA que le délai d'accès augmente rapidement avec la charge du réseau 802.11 avec infrastructure.

### 2.5.5.3- Le problème de BEB [Car03][Chu05][Byu05]

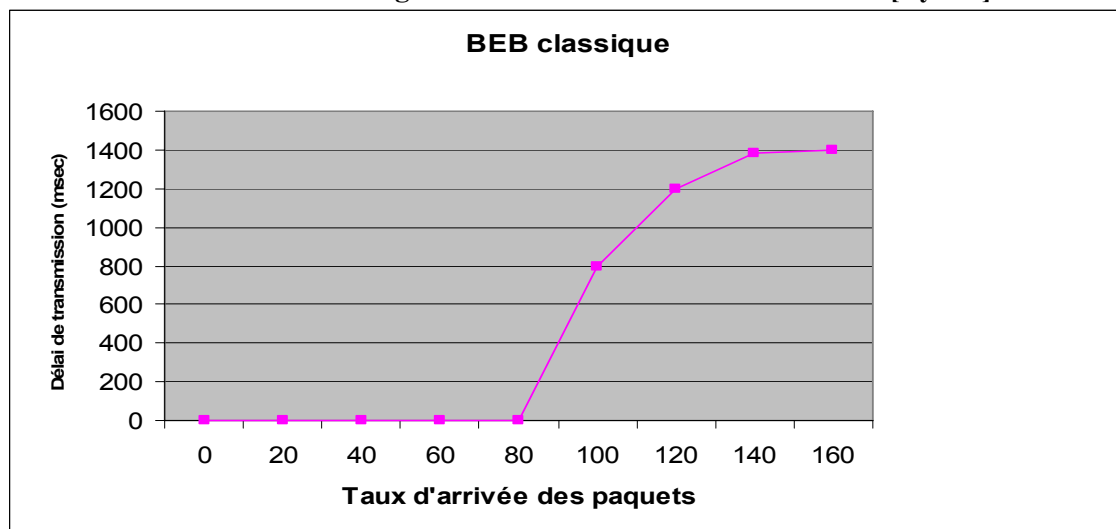
Dans le protocole BEB, le débit entre les stations n'est pas équitable, certaines stations dans un même réseau peuvent disposer d'un débit différent de celui des autres stations en raison du paramètre CWi qu'elles gèrent. Dans le mécanisme de base prévu dans la norme, une station remet sa fenêtre de contention à sa largeur minimale (CW réinitialisé avec CWmin), suite à un succès, ou quand le nombre maximum de tentatives de transmission pour une trame est atteint. Le fait que la taille de la fenêtre de contention soit fixée à nouveau à CWmin, cause une variation très grande de la taille de fenêtre de contention, et dégrade le comportement d'un réseau quand celui-ci est fortement chargé. De plus, chaque nouvelle trame commence par la fenêtre minimale de contention, elle est d'une certaine façon prioritaire, ce qui n'est pas justifié. Dans le cas d'un réseau chargé, le retour brutal à la plus petite des fenêtres est une mauvaise stratégie [Byu05].

La figure II.18 montre que pour une simulation faite avec 5 mobiles évoluant dans une cellule 802.11 et qui communiquent entre eux en produisant un trafic suivant une loi normale, le délai de transmission augmente quand le taux de production des trames augmente.

Dans cette simulation, les principaux paramètres sont les suivants :

Nombre des mobiles	5 mobiles
Simulateur	OPNET
Cw(max)	1024 (Time slot)
Cw(min)	16 (Time slot)
Taille des trames	1024 octets

**Tableau II.6 : Configuration de la simulation utilisée dans [Byu05].**



**Figure II. 18:Résultats de la simulation de BEB [Byu05]**

Dans cette figure, nous observons qu'en utilisant BEB, si le taux d'arrivée des paquets augmente alors le temps de transmission entre les mobiles augmente d'une valeur très grande. D'une façon générale, les résultats obtenus par cette simulation montrent que les performances de BEB diminuent quand la charge du réseau augmente.

#### 2.5.5.4- Critique de CSMA/CA

Les travaux que nous venons de résumer ainsi que d'autres études [Zio02] indiquent clairement que le protocole de base CSMA/CA possède des performances non directement compatibles avec les objectifs et les caractéristiques des applications qui ont besoin un petit délai de transmission (applications temps réel).

#### 2.5.6- Evaluation de PCF

Pour étudier les performances de PCF, une simulation a été faite, avec un simulateur qui s'appelle GloMoSim, dans [Chi06]. Dans cette simulation, N nœuds mobiles ont été pris, évoluant dans une cellule 802.11 et échangeant entre eux deux types de trafic (FTP, CBR) en utilisant la méthode PCF. Parmi les N nœuds, trois mobiles de références 0, 1, 2 ont été choisis.

Le tableau suivant montre les types de trafic échangé entre les mobiles de référence durant cette simulation.

Mobile	Type de trafic
0-1	FTP
0-2	CBR

**Tableau II.7 : Type de trafic échangé entre les mobiles.**

Dans cette simulation, le nombre N de stations évoluant dans une cellule 802.11 varie. A chaque calcul, il augmente de 5 stations. Les résultats de ces simulations permettent d'estimer le délai de transmission entre les mobiles de référence selon chaque type de trafic en utilisant deux modes de PCF :

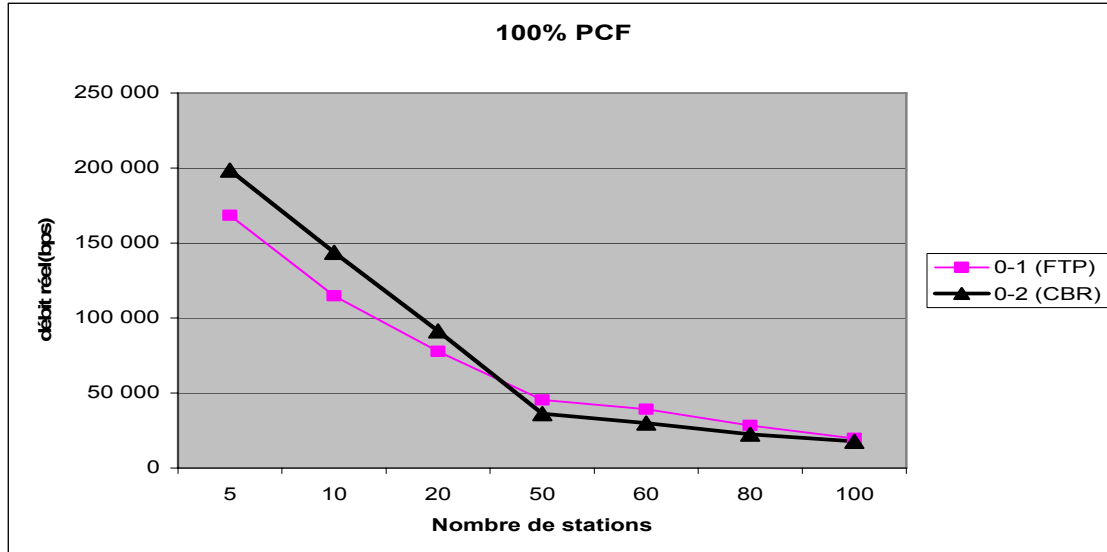
- 1- mode PCF totale (100% PCF).
- 2- mode PCF+DCF (50% PCF, 50%DCF).

Cette simulation est basée sur des paramètres décrits dans le tableau II.8 suivant :

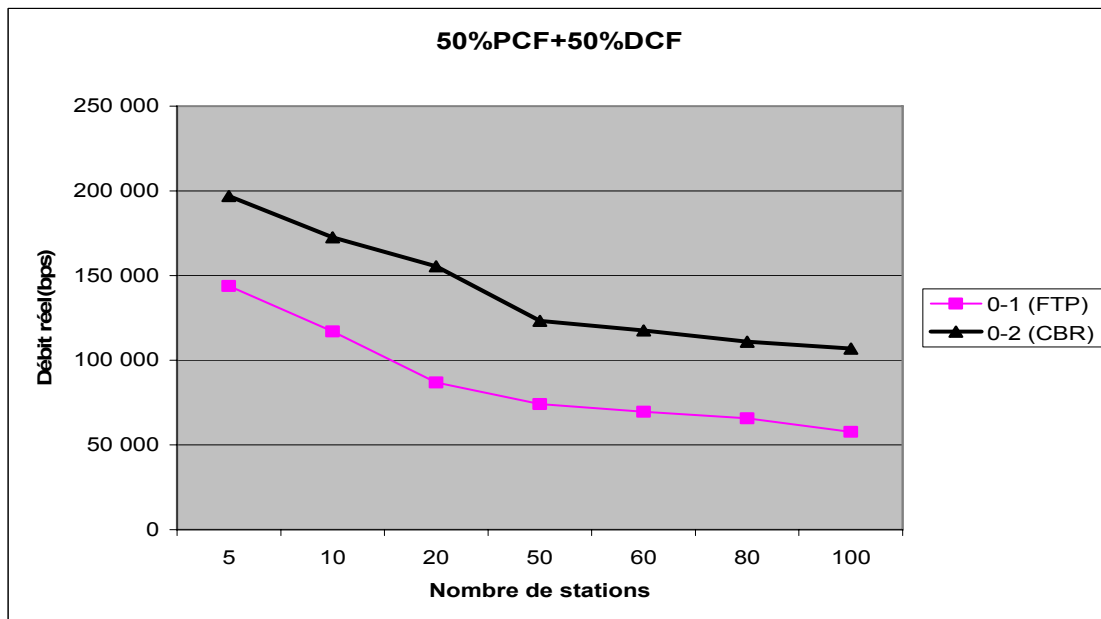
Période de répétition de l'intervalle CFP	700 ms
Période CFP (cas de PCF+DCF)	350 ms
Fréquence du canal	2.4 GHZ
Temps de simulation	5 minutes

**Tableau II.8 : Paramètres des simulations.**

Les figures II.19 et 20, montrent que le débit réel, entre trois mobiles de référence utilisant deux types de trafic différents, est inversement proportionnel au nombre total des nœuds dans la cellule. Ce débit diminue à chaque augmentation du nombre de mobiles, ce qui est dû au trafic généré par les autres mobiles.



**Figure II. 19: Débit réel par rapport au nombre de stations (cas 100% PCF)**



**Figure II. 20: Débit réel par rapport au nombre de stations (cas 50%PCF+50%DCF)**

Les travaux que nous venons de résumer ainsi que d'autres études [Far06][Ebe00] montrent qu'en utilisant la méthode PCF, le débit réel diminue rapidement quand le nombre de stations du réseau augmente.

## Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique de notre sujet. Nous avons donné une synthèse des principaux modèles de propagation existants, puis, nous avons détaillé les différents types d'échanges. Enfin, nous avons étudié la méthode d'accès au médium de la norme 802.11. Le tableau II.9 montre les méthodes ou les modèles cités dans le chapitre 2 et leurs problèmes.

<b>Méthodes ou modèles classiques</b>	<b>Problèmes</b>
Modèle de propagation de base (Free space)	C'est un modèle idéal et il n'est pas compatible avec le domaine industriel.
CSMA/CA	Le délai de transmission augmente d'une valeur très grande quand la charge de la cellule augmente.
BEB	Pas adapté aux applications qui ont besoin des délais de transmission faible et surtout quand la charge de la cellule augmente
Echange (via réseau 802.11) entre les stations qui ont besoin de coopérer et qui utilisent l'unicast classique	Le nombre des échanges est très grand, ce qui charge la cellule.
Echange (via réseau 802.11) entre les stations qui ont besoin de coopérer et qui utilisent le broadcast et multicast.	La présence des beacons augmente le temps nécessaire à la diffusion.

**Tableau II.9 : Méthodes ou modèles classiques et leurs problèmes.**

Dans le chapitre 3 suivant, nous allons parler des méthodes proposées pour minimiser le temps de cycle d'échanges entre mobiles coopérant dans une cellule d'un réseau 802.11 avec infrastructure en environnement industriel.

# Chapitre 3

## **Contribution aux échanges intracellulaires de type multicast**



## **Introduction**

Ce chapitre présente notre contribution dans le cadre de cette thèse, il est composé de trois grandes parties : la première décrit le domaine de notre travail (projet WAVES), la deuxième partie décrit les méthodes proposées pour minimiser le temps de cycle d'échanges entre mobiles coopérant, via un réseau 802.11. Cette partie est elle-même composée de deux sous-parties. Pour atteindre nos objectifs nous avons pensé à :

- Étudier plusieurs stratégies d'échanges qui se basent sur le multicast et le broadcast ;
- Étudier un algorithme « du type Back-off » autre que BEB qui donne des résultats plus performants pour les applications visées dans notre étude.

Ces deux derniers points ont été développés pour satisfaire certaines contraintes attachées aux applications industrielles comme la robotique mobile, les chaînes de production, les ateliers flexibles,...etc. La dernière partie décrit le modèle de propagation qui correspond à de tels environnements.

### **3.1- Présentation de l'application générique WAVES et des objectifs de cette thèse**

#### **3.1.1- Présentation du domaine**

Le travail consigné dans cette thèse s'appuie sur une application générique qui sert de fil conducteur à la prise en compte de différentes problématiques par certains des membres de l'équipe Réseaux et Protocoles du LIMOS [Her06][Her04][Laf03].

Cette application générique est centrée sur l'utilisation de mobiles guidés automatisés ou AGV (Automated Guided Vehicles). Il s'agit généralement de systèmes autonomes dotés de la capacité de déplacement, conçus pour réaliser différentes tâches, généralement dans un contexte industriel ou en milieu hostile. Robots d'entrepôts, convoyeurs de bagages, supports de montage dans une chaîne d'assemblage, voire robots d'intervention en milieu radioactif, sont des exemples de ce type de matériel.

La plupart de ces systèmes présentent des limitations dues principalement au principe de guidage utilisé : repères au sol (magnétiques ou optiques), câble, rail, ... Ces limitations influent sur les performances globales du système au niveau du degré de mobilité dans l'installation et de la vitesse de déplacement des mobiles impliqués. Indirectement, la complexité des missions susceptibles d'être réalisées par les éléments mobiles est aussi impactée.

Il convient de définir trois catégories d'informations échangées entre les différents éléments du système exploitant des robots mobiles coopérants :

- les informations applicatives ;

- les informations de coopération ;
- les informations locales.

Les informations applicatives sont échangées entre les mobiles et le système de gestion central (ou superviseur). Il s'agit principalement d'instructions destinées aux mobiles, nécessaires à la définition et à la réalisation de l'activité de chacun d'eux, ou bien d'informations issues des mobiles et adressées au système central, pour rendre compte de leur activité, selon différents niveaux de détails.

Les informations de coopération permettent aux mobiles d'interagir dans la réalisation de leur mission. Il s'agit par exemple de régler, par la négociation ou l'application de règles préétablies, l'utilisation d'une ressource commune : l'espace pour les déplacements ou l'accès à un équipement particulier par exemple.

Les informations locales sont échangées entre les mobiles et les autres éléments de l'installation. Par exemple, un mobile peut être amené à solliciter l'ouverture d'une porte, l'activation d'un aiguillage sur un rail, l'appel d'un ascenseur, la manipulation d'un système de chargement et de déchargement, ...

Il est évident que la réalisation d'une tâche ou d'une étape particulière de l'activité nécessite généralement un ensemble d'informations issues d'une ou de plusieurs des catégories de trafic identifiées.

### **3.1.2- Projet WAVES [Laf03]**

#### **3.1.2.1- Les objectifs du projet WAVES**

L'idée de départ du projet WAVES (Wi-Fi for Automatic guided vehicules) est le pilotage de mobiles coopérants guidés à l'aide de solutions sans fils. Un mobile peut être un chariot transportant des bagages dans un aéroport (raison historique de ce thème de recherche) ou encore des marchandises dans un entrepôt. Dans ces deux cas, un mobile doit coopérer avec ses voisins pour éviter les collisions, il doit donc échanger avec les autres des informations de vitesse et de position.

#### **3.1.2.2- Solution existante**

Les origines du projet WAVES reposent sur une analyse critique d'une solution existante qui consiste à piloter les mobiles par la voie sur laquelle ils circulent (Figure III.1). Le pilotage est alors supervisé par une station maître qui contrôle la flotte de mobiles à sa portée. Cette solution est basée sur la présence de capteurs tout au long du circuit. Ceux-ci permettent de connaître les positions des mobiles. De plus, les mobiles, ici de simples chariots, n'ont aucune

intelligence puisque celle-ci se trouve uniquement dans le superviseur qui pilote chaque mobile au moyen d'impulsions électromagnétiques aussi bien pour son avancement que pour son freinage. Un tel système a été étudié et maqueté par une entreprise belge qui fût partenaire de l'équipe de recherche Réseaux et Protocoles. En cas de défaillance de la part du superviseur, le système peut alors être fortement endommagé. Enfin, si le circuit est d'une longueur assez importante, le nombre de capteurs augmente considérablement. Cette solution devient alors trop coûteuse, difficile à mettre en œuvre et ne permet pas une évolution facile.

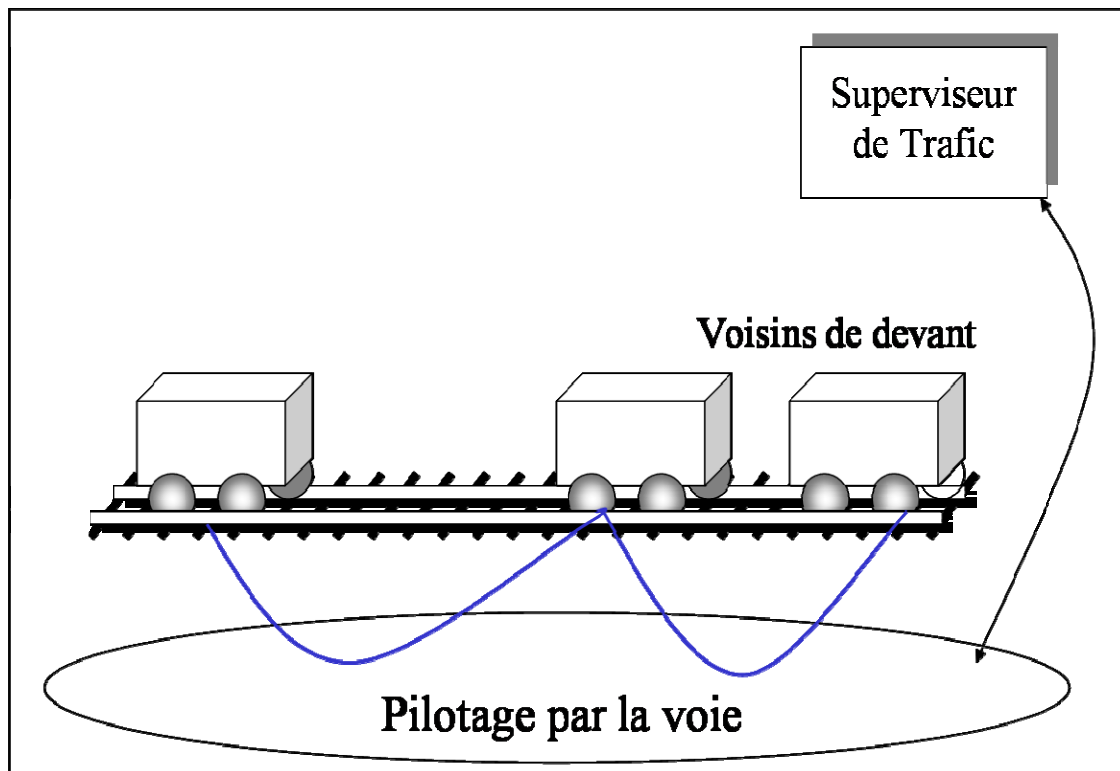
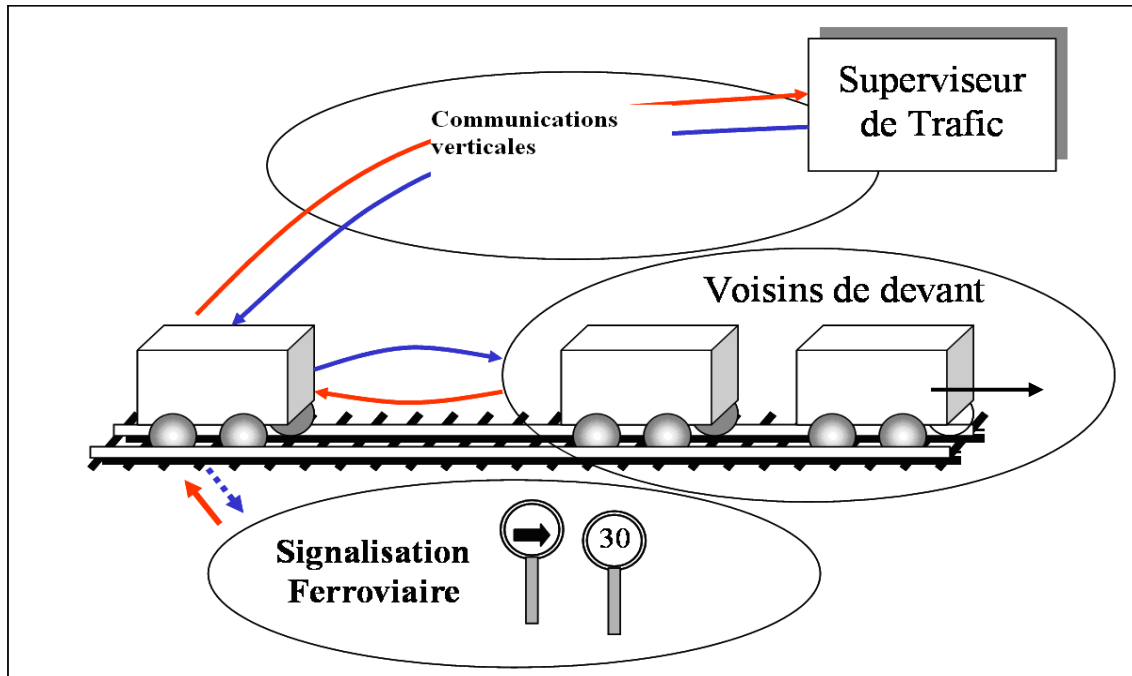


Figure III. 1: Commande par la voie.

### 3.1.2.3- Les communications nécessaires en sans fils

La mise en œuvre de la coopération entre les mobiles nécessite des communications de différents types (figure III.2). L'application WAVES nécessite des communications entre les mobiles voisins qui doivent être réalisées le plus fréquemment possible, ces types d'échanges font partie de ce que nous appellerons communications horizontales tout comme les échanges entre les mobiles et la signalisation. L'autre type de communication est dit vertical car c'est une communication entre un mobile et le superviseur de trafic qui lui donne, entre autres, les ordres correspondant à sa mission.



**Figure III. 2: Ensemble des communications.**

La signalisation est présente pour indiquer aux mobiles un événement important qui va changer leur comportement. En effet, avec ce système, on peut signaler aux mobiles qu'ils entrent dans une zone où ils vont être amenés à réaliser un changement de cellule. On peut aussi fixer une limitation de vitesse aux mobiles ou encore leur dire de s'arrêter pendant un temps donné si nécessaire.

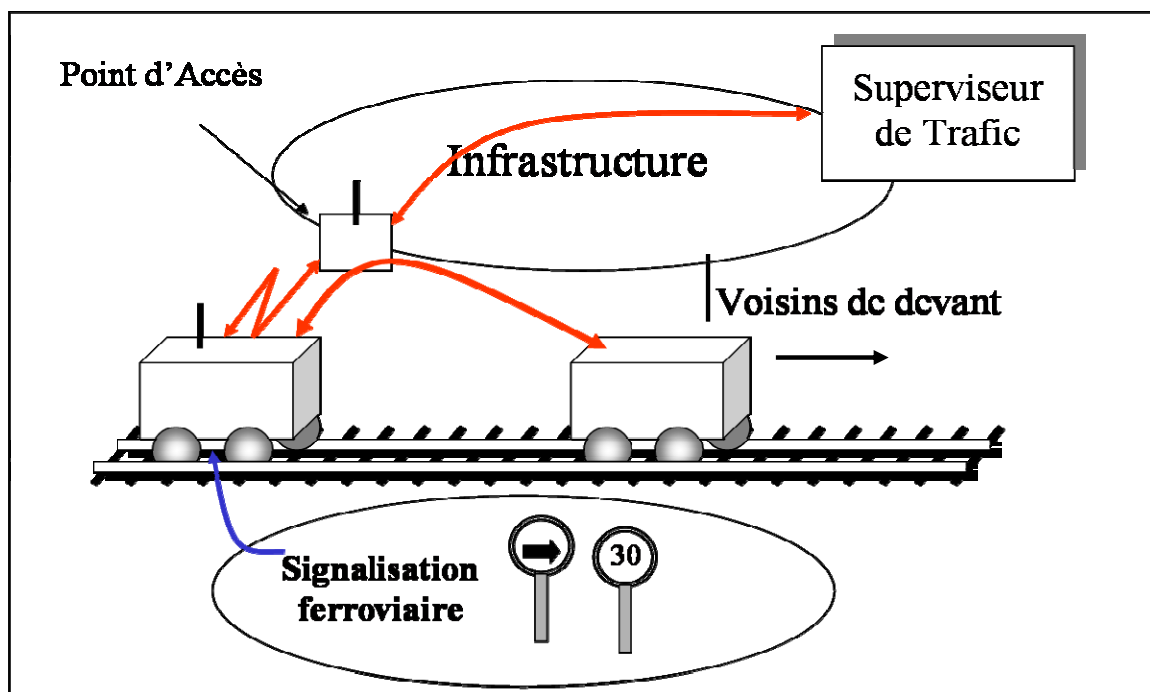
#### **3.1.2.4- Les solutions envisagées**

L'utilisation de moyens de communication sans fil s'impose pour répondre aux besoins des applications que nous venons d'évoquer. L'équipe Réseaux et Protocoles a donc envisagé plusieurs solutions avec les moyens existants qui permettent de réaliser une couverture sur une zone géographique plus ou moins importante. Plusieurs technologies sont alors à considérer, comme HiperLAN, Bluetooth et 802.11. Le problème de la norme HiperLAN (High Performance Local Area Network), est qu'elle n'a pas véritablement engendré des produits commercialisés. Bluetooth, ayant des cellules de petites tailles, et ne permettant pas un changement rapide de cellules, ne peut pas convenir. La solution retenue est l'utilisation des produits issus de la norme IEEE802.11 car elle prévoit un mode infrastructure qui convient au type d'application « WAVES ». En effet une solution conforme à la norme IEEE802.11 permet de réaliser une couverture cellulaire importante et ainsi de minimiser le problème de coût. De plus, cette norme ne prévoit pas de limite en nombre de stations connectées à un point d'accès. Des études antérieures à cette thèse ont montré, pour une

topologie avec infrastructure, qu'un nombre maximum d'une vingtaine de stations pour obtenir une interrogation cyclique correcte, c'est à dire suffisamment rapide, doit être respecté [Laf03]. Le temps de passage d'un point d'accès à l'autre étant plus faible que le changement de Piconet dans Bluetooth, l'équipe s'est donc naturellement orientée vers cette solution.

Un des objectifs du projet WAVES est d'étudier et de maîtriser une solution dérivée du standard IEEE 802.11 pour une telle application en milieu industriel, là où les contraintes sont plus importantes. C'est le cas par exemple, pour une application industrielle qui nécessite des échanges en temps réel à travers des liens sans fil, ou encore dans un milieu où l'on ne peut se permettre de déployer un réseau câblé. Ici la contrainte temps réel est forte, on ne peut se permettre que des mobiles se percutent, pour cela il faut que chacun d'entre eux connaissent les informations de position et de vitesse de ses voisins, les plus récentes possibles.

On peut représenter le fonctionnement de la solution avec infrastructure comme suit :



**Figure III. 3: Solution IEEE 802.11.**

Dans une solution avec infrastructure, les communications inter-mobiles ne sont plus horizontales car les échanges doivent nécessairement passer via les points d'accès qui relaient alors les trames vers les stations destinataires.

Compte tenu des objectifs du projet WAVES et en particulier de son aspect temps réel, il a été décidé de faire jouer au point d'accès le rôle de Maître pour l'ensemble des stations mobiles

de sa cellule dont le trafic est contraint temporellement qui seront alors ses Esclaves. Le choix a été fait de réaliser une émulation PCF qui sera présentée dans la partie trois de ce chapitre.

Le point d'accès a donc un rôle essentiel car il faut qu'il interroge tous les mobiles qui lui sont affiliés, et ce, le plus souvent possible. Pour optimiser le trafic, le point d'accès, qui connaît les informations de tous les mobiles de sa cellule, va communiquer celles des autres mobiles à celui qu'il interroge. Pour cela une notion de « mémoire cache » a été utilisée pour permettre aux points d'accès d'accélérer la diffusion de cette connaissance. Le point d'accès interrogeant fréquemment et le plus rapidement possible ses stations, celles-ci fournissent des informations à la cadence de cette sollicitation.

Dans le projet WAVES, nous travaillons sur une cellule qui contient au maximum 15 mobiles qui peuvent coopérer entre eux en utilisant plusieurs méthodes d'échanges comme l'unicast, le multicast et le broadcast. Cette limite de 15 mobiles par cellule est suffisamment grande pour couvrir une part très significative des applications.

### **3.1.2.5- Les stratégies d'échanges utilisées dans WAVES**

#### **a- Principe**

Le projet WAVES dont la présentation vient d'être faite, concerne un ensemble de mobiles, pilotés à l'aide d'un réseau sans fil de type 802.11 en mode infrastructure constitué d'une ou de plusieurs cellules. Ces mobiles doivent être interrogés de façon périodique afin qu'un asservissement puisse être assuré entre eux [Her04] [Laf03]. La fréquence de ces interrogations est critique pour des mobiles amenés à coopérer ne serait-ce que pour se déplacer les uns derrière les autres. Dans ce cas, l'intervalle de sécurité qui doit être laissé entre ces mobiles associé à leur vitesse et à l'algorithme d'asservissement de vitesse produit une limite supérieure pour la fréquence d'interrogation. Par analogie il est possible d'exprimer une limite équivalente pour les différentes interactions entre mobiles impliqués dans une même coopération. La plus petite de ces limites permet de s'assurer d'avoir un fonctionnement en toute sécurité entre les diverses entités mobiles. Différentes stratégies ont été étudiées par l'équipe de WAVES pour interroger des mobiles agissant sous une cellule. Quelques de ces stratégies proposées donnent au point d'accès une fonction de type « mémoire cache » qui permet à ce dernier de servir de miroir pour diffuser entre les mobiles, l'information à partager.

Il était nécessaire de connaître les possibilités de chacune de ces stratégies vis-à-vis de notre problématique de trafic temps réel. Les stratégies définies dans WAVES (tableau III.1) sont décrites dans le paragraphe c.

TRAMES	Point d'accès	Station
	Broadcast	Broadcast
	Broadcast	Unicast
	Unicast	Broadcast
	Unicast	Unicast

**Tableau III.1: Stratégies d'échanges intracellulaires**

Avant de décrire ces méthodes d'échanges, il est intéressant de définir ce qu'est un cycle d'échanges entre les mobiles évoluant dans WAVES.

### **b- Cycle d'échanges**

Nous introduisons la notion de cycle d'échanges dont le principe est relativement simple. C'est le temps nécessaire pour que tous les mobiles impliqués dans une coopération ait pu diffuser les informations nécessaires à cette ou à ces coopérations à tous leurs partenaires. Ceci peut être réalisé de différentes façons, dans une cellule la place particulière du point d'accès a influé sur les solutions proposées, dans un premier temps nous en donnons un exemple. Le point d'accès dispose déjà de la liste (Table d'affiliation) des stations de la cellule à gérer. Il est possible de lui associer la liste des stations coopérantes (tout ou partie de la table d'affiliation). Chaque station dispose d'un identifiant unique ou numéro d'ordre. Le point d'accès interroge la première station de sa liste. Cette station émet alors une trame de réponse qui contient les informations que la station doit rendre publique au sein de la cellule dans le cadre du trafic coopératif intracellulaire. Le point d'accès traite alors la station suivante et le cycle se termine lorsque la dernière station de la liste a répondu. Un nouveau cycle est alors initié. L'indice de performance des différentes stratégies sera donc la durée de réalisation du cycle ainsi que la stabilité des résultats obtenus. La durée d'un cycle est en fait l'intervalle de temps qui sépare l'interrogation de la première station de la liste du moment où toutes les stations ont connaissance de l'ensemble des réponses fournies par chacune d'entre elles. Nous verrons par la suite que le calcul de cette durée de cycle diffère selon la stratégie utilisée.

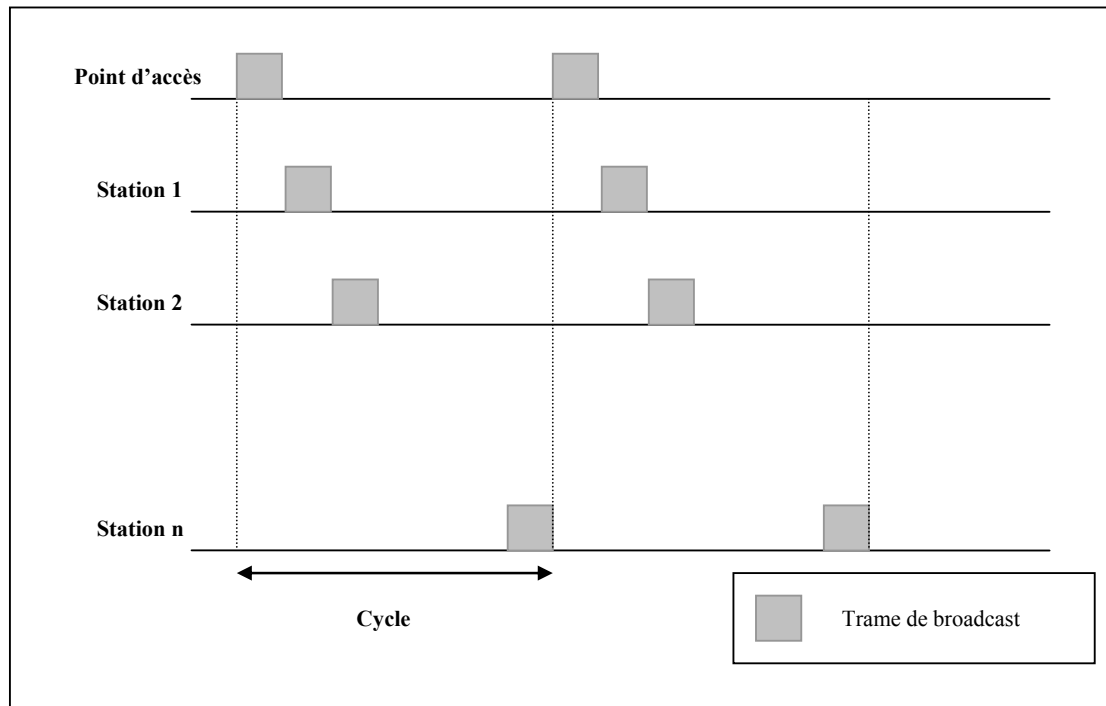
### **c- Présentation des différentes stratégies retenues dans WAVES**

#### **c.1- Broadcast-broadcast**

Cette stratégie nécessite d'instaurer un ordre de réponse au sein des stations. Cet ordre peut être défini dans la trame initiale issue du point d'accès ou par paramétrage des stations. Le point d'accès diffuse une trame destinée à initier le cycle. Dès réception, la première station diffuse sa réponse à tous les autres mobiles via le point d'accès. A son tour, la station suivante diffuse sa réponse et ainsi de suite jusqu'à la dernière station. A réception de la réponse de la

dernière station, le point d'accès recommence le processus. La Figure III.4 présente cet enchaînement pour n stations.

Dans les figures qui vont suivre, les trames diffusées sont représentées par des carrés pleins colorés en gris, les trames en point à point par des carrés vides fléchés colorés en noir.



**Figure III. 4: Stratégie broadcast-broadcast.**

Dans le cas où une station ne reçoit pas la réponse de la station précédente, le cycle est interrompu (cette situation peut être restaurée à l'expiration d'un temporisateur, ce point ne sera pas développé dans ce travail).

Les trames de broadcast reçues par le point d'accès (de la part des mobiles) vont d'abord être stockées par celui-ci dans l'attente du prochain départ d'un « beacon » DTIM avant d'être remises aux stations (ou aux autres points d'accès) concernées pour modifier leurs informations. L'interrogation cyclique est donc tributaire de la cadence à laquelle partent les « beacons ».

A noter que si cela était nécessaire cette méthode offre des facilités pour économiser l'énergie des mobiles.

Dans la méthode « broadcast-broadcast » le trafic broadcast est transmis après chaque « beacon » (ou balise) DTIM (Delivery Traffic Indication Message) pour rester compatible avec le mode économie d'énergie. Le « beacon » prévient l'ensemble des stations d'une diffusion. Ces « beacons » DTIM sont émis par le point d'accès de façon périodique. Dès

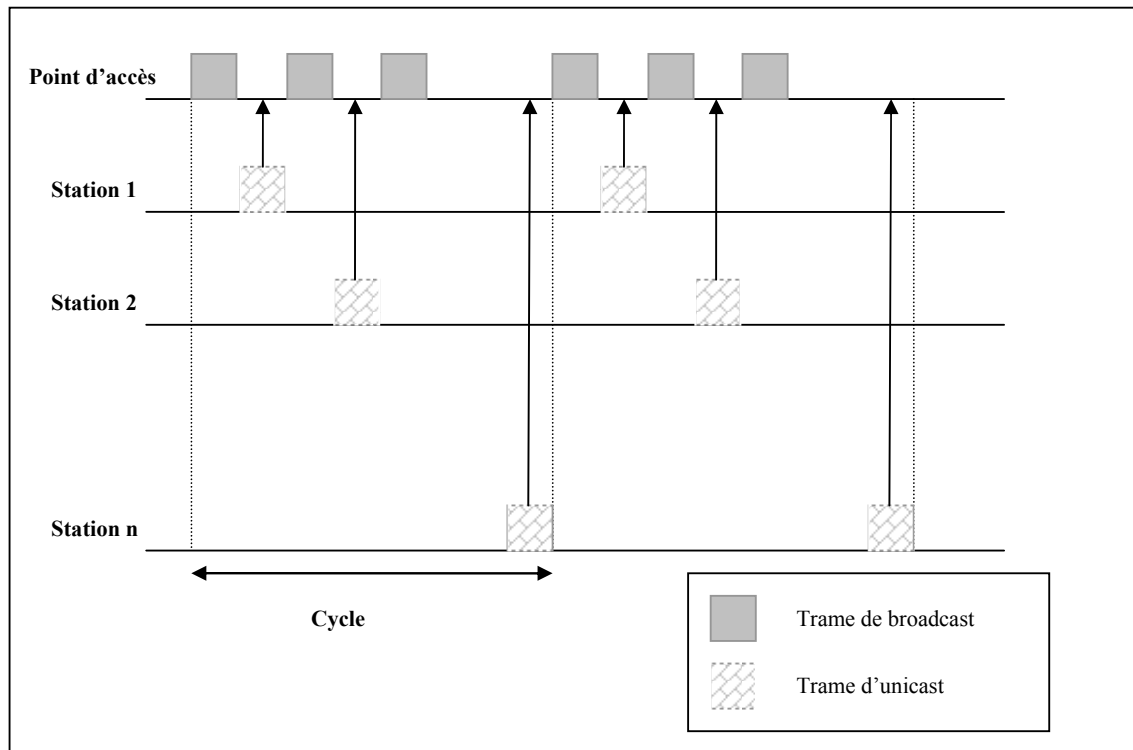


qu'un mobile a émis sa trame de diffusion, il peut donc dormir au niveau réseau (son interface réseau est dans l'état économie d'énergie) jusqu'à l'heure prévue pour l'arrivée du prochain beacon.

Les niveaux d'énergie manipulés dans le projet WAVES ne justifient pas vraiment d'optimisation à ce niveau.

### c.2- Broadcast-unicast

La liste des stations gérée par le point d'accès est aussi à la base de cette technique. Le point d'accès diffuse une trame qui contient la réponse de la station  $i$  et l'identifiant de la station  $i + 1$ . Dès réception, la station  $i + 1$  adresse sa réponse au point d'accès. A réception, le point d'accès traite la station suivante jusqu'à la fin du cycle et initie un nouveau cycle (principe de Time Division Duplex dans Bluetooth décrit dans la partie 1.2.3.1). La réponse de la dernière station de la liste constitue les informations de base de la trame d'interrogation de la première station. La Figure III.5 illustre ce mécanisme.



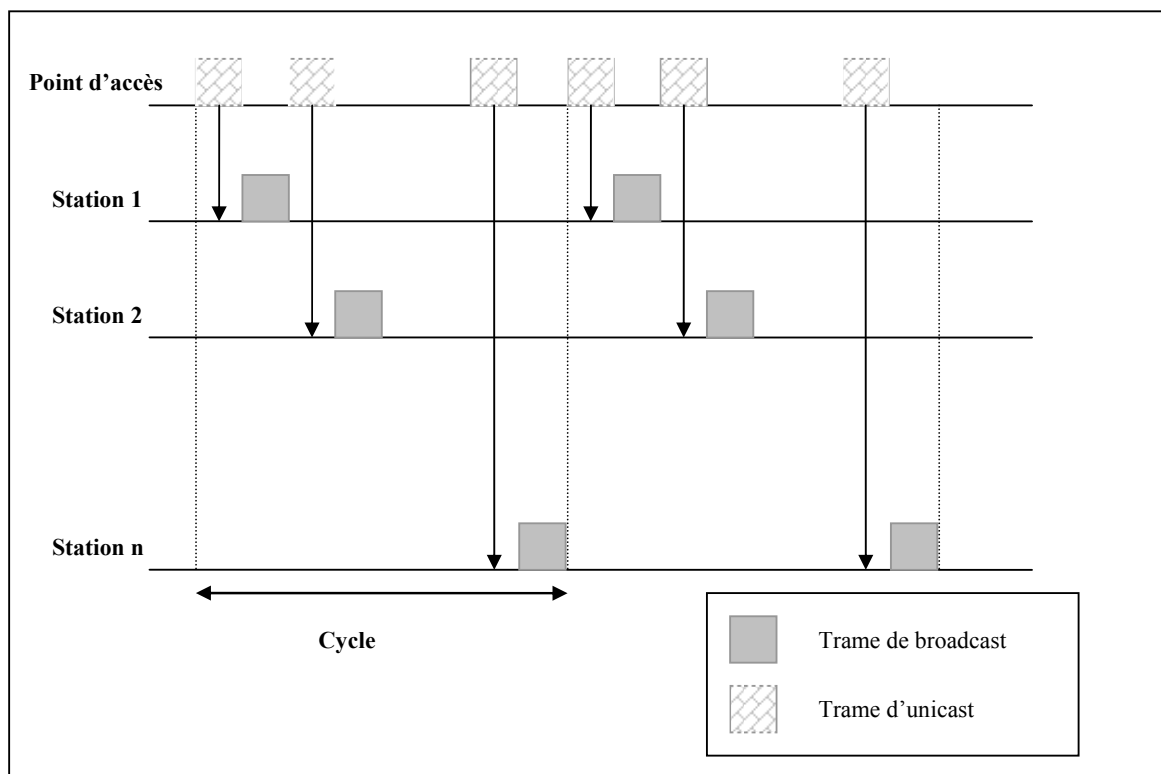
**Figure III. 5: Stratégie broadcast-unicast.**

Par rapport à la méthode précédente, les incertitudes liées à l'absence d'acquittement des trames diffusées sont à moitié levées. Les trames de réponse adressées au point d'accès sont acquittées au niveau MAC et donc éventuellement réémises si nécessaire de manière automatique. De plus, il est assez facile de mettre en place au niveau du point d'accès un

dispositif de réémission des trames d'interrogation basé sur la gestion d'un délai de réponse. Les diffusions faites par le point d'accès sont toujours tributaires du départ des « beacons ».

### c.3- Unicast-broadcast

Cette stratégie est assez similaire à la précédente, le point d'accès adresse une trame d'interrogation à une station. Dès réception, la station diffuse sa réponse à travers le point d'accès. Cette réponse prise en compte, le point d'accès traite la station suivante de sa liste jusqu'à la fin du cycle et recommence. La Figure III.6 présente cette méthode.



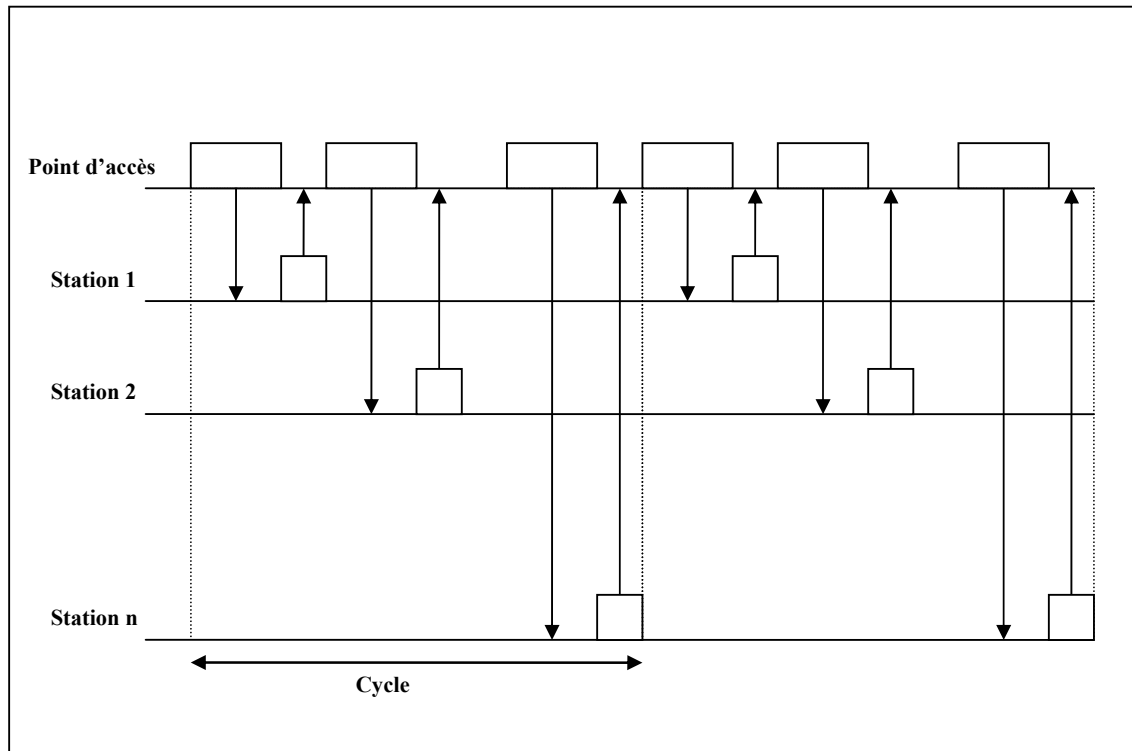
**Figure III. 6: Stratégie unicast-broadcast.**

Comme pour la méthode précédente, les incertitudes liées à l'absence d'acquittement des trames diffusées sont à moitié levées. Les trames d'interrogation sont acquittées. Il est également possible de mettre en place au niveau du point d'accès un dispositif de réémission des trames d'interrogation. L'attente du départ du prochain beacon pour diffuser aux stations produit un phénomène de groupage décrit dans [Laf03] qui prouve que la durée du temps de cycle est encore tributaire de la fréquence des beacons.

### c.3- Unicast-unicast

Contrairement aux trois méthodes d'échanges citées avant, cette stratégie donne au point d'accès la fonction de « mémoire cache ». Le point d'accès adresse une trame d'interrogation

à une station. Cette trame représente la connaissance du point d'accès. Il s'agit en fait de la totalité des informations les plus récentes communiquées jusque là par les stations de la liste. Dès réception, la station adresse sa réponse au point d'accès. A partir de cette réponse, le point d'accès rafraîchit sa connaissance, traite la station suivante jusqu'à la fin du cycle et débute un nouveau cycle. La Figure III.7 présente cette dernière stratégie.



**Figure III. 7: Stratégie unicast-unicast.**

L'avantage de cette méthode est que chaque trame bénéficie intégralement pour son acheminement des dispositifs du standard tels que l'acquittement et la réémission.

L'inconvénient majeur est l'augmentation de la taille des informations à transmettre. Nous pouvons cependant optimiser les échanges en personnalisant pour chaque station les informations présentes dans la trame d'interrogation.

#### **d- Critique de ces stratégies**

Le problème des trois premières stratégies est qu'elles sont basées sur le broadcast. Cela conduit à être tributaire des « beacons » DTIM. L'utilisation des « beacons » induit un délai nécessaire à sa diffusion périodique et cela augmente le temps du cycle (annexe C). Pour ces raisons, nous avons réfléchi à d'autres méthodes qui n'utilisent pas les « beacons » et qui sont néanmoins différentes de la méthode unicast-unicast. Cette dernière se caractérise par la grande taille de la trame émise.

### **3.2- Les objectifs de cette thèse**

Notre travail de thèse consiste à chercher à minimiser le cycle de transmission des informations temps réel entre les mobiles évoluant dans un réseau Wi-Fi industriel. La solution étudiée sera évaluée à partir d'un travail de simulation fait à partir de l'outil NS2.

Ceci nous a conduit à organiser notre travail en deux grandes étapes :

- le choix du modèle de propagation qui convient le mieux à l'application WAVES ;
- l'optimisation du temps de cycle des échanges dans WAVES.

#### **3.2.1- Démarche pour le choix d'un modèle de propagation en milieu industriel**

Cette partie comporte elle-même plusieurs étapes :

##### **a- Choix d'un modèle de propagation**

Dans cette partie, nous cherchons un modèle de propagation qui puisse être fidèle aux conditions de propagation d'un milieu industriel tel que celui de WAVES. Dans cette recherche, nous étudierons la pertinence des modèles suivants:

- Free space model;
- Shadowing model;
- Modèle ITU.

##### **b- Validation d'un modèle de propagation pour un site industriel**

Il n'existe pas de modèle générique pour l'ensemble des applications industrielles, il n'est donc pas facile d'imaginer un modèle comme solution unique et universelle. Dans l'équipe Réseaux et Protocoles, il a été décidé :

- de procéder à des mesures de propagation dans un atelier représentatif d'un ensemble d'applications industrielles ;
- de modéliser parallèlement les conditions de propagation à l'aide de NS2 et d'OPNET, deux outils de modélisation et de simulation très utilisés pour les réseaux locaux sans fil ;
- de valider par comparaison les résultats obtenus par les mesures et par ces deux filières.

Ce choix étant validé, nous nous servirons du modèle pour fixer la taille de cellule optimale pour le domaine industriel choisi.

#### **3.2.2- Minimisation du temps de transmission d'un cycle**

Notre but dans le projet WAVES est de contrôler des mobiles évoluant dans un site industriel via un réseau au standard 802.11. Ces mobiles ont besoin de coopérer entre eux, ce qui les conduit généralement à échanger des informations contraintes par le temps.

Pour échanger leurs informations entre eux (position, vitesse,...), chaque mobile évoluant dans le réseau WAVES doit prendre part à un cycle de transmission (si possible périodique) avec les autres mobiles.

Dans cette partie notre but est de diminuer au maximum la durée de ce cycle.

Pour le minimiser nous travaillons sur plusieurs axes :

- trouver la méthode d'échanges optimale entre les mobiles;
- trouver l'algorithme de Back-off optimal qui minimise le temps de transmission entre les entités communicantes.

### 3.3- Stratégies d'échanges proposées

Dans cette partie, nous allons présenter les méthodes d'échanges proposées pour minimiser le temps de cycle d'échanges entre les mobiles.

Considérons :

- un groupe de diffusion composé de  $n+1$  éléments ;
- un mécanisme de multicast donné.

Notre but dans cette étape est d'évaluer le temps nécessaire pour que la diffusion à tous les membres du groupe soit complètement réalisée.

Si  $T_{\text{multicast}}$  est cette durée, il peut être défini comme le temps séparant l'envoi du message « multicasté » ( $T_{\text{emis}}$ ) et le temps correspondant à la prise en compte de ce message par le dernier servi des  $n$  éléments du groupe  $T_{\text{reci}}$ , c'est à dire :

$$T_{\text{multicast}} = \text{Max}_n (T_{\text{reci}} - T_{\text{emis}}) \quad (3.1)$$

$T_{\text{reci}}$  : représentant la date de la réception du message multicasté par la station  $i$  du groupe multicast.

Puisque la fréquence des échanges de données et la stabilité de cette fréquence sont des paramètres cruciaux dans de telles applications coopérantes, notre objectif est de spécifier un mécanisme de multicast qui puisse satisfaire la relation :

$$A < T_{\text{multicast}} < B \quad (3.2)$$

Avec  $A$  et  $B$  des constantes petites ( $B$  de l'ordre de 100 ms par exemple) pour satisfaire les contraintes temporelles induites par les coopérations.

Pour coopérer, un mobile a besoin de discuter avec un ou plusieurs mobiles situés dans la même cellule que lui ou dans des cellules voisines.

Il faut rappeler que pour ce type de réseaux, les paquets ou les trames de station à station transitent nécessairement par un ou plusieurs points d'accès : une émission logique induit donc plusieurs émissions physiques.

De plus, quand il s'agit d'atteindre une station par Xcast (broadcast ou multicast), il faut avoir la certitude qu'elle soit réveillée (hors de l'état économie d'énergie). Une telle opération est donc différée dans le point d'accès pour attendre qu'un « beacon » soit envoyé pour demander que toutes les stations soient à l'écoute.

Dans le cas d'un Xcast, si  $T_{\text{beacon}}$  est la période d'émission des « beacons », on en déduit immédiatement :

$$\boxed{\begin{array}{l} T_{\text{multicastmoyen}} > T_{\text{beacon}/2} \quad (3.3) \\ \text{et } B > T_{\text{beacon}} \end{array}}$$

La période d'émission des « beacons » étant fixée à la valeur optimale de 100 ms par la norme [Laf03], l'objectif fixé en (3.2) est difficile à tenir.

Augmenter la fréquence des « beacons » n'est pas le bon réflexe car la bande passante dans la cellule en serait réduite [Laf03]. Ceci nous conduit donc à spécifier et à évaluer des mécanismes de multicast spécifiques basés sur un adressage de niveau 2 et pour lesquels les points d'accès auront un rôle important.

Pour évaluer la borne A de l'équation (3.2) pour un mécanisme de multicast donné dans une cellule, il suffit de supposer que le trafic engendré ne soit soumis à aucune concurrence au niveau de l'accès au médium.

Pour viser pour la borne B de cette équation une valeur faible et facile à évaluer à partir du nombre de mobiles, nous allons revenir au niveau d'une des fonctionnalités du point d'accès : le mode PCF (Point Coordination Function) de la norme 802.11 [Muh02]. Dans cette option le point d'accès va cadencer tous les échanges dans la cellule, y compris ceux du multicast.

Nous allons décrire maintenant les méthodes proposées pour évaluer l'équation (3.2).

### **3.3.1- Méthode multiple unicast**

#### **3.3.1.1- Principe de multiple unicast**

Notre objectif est de réaliser une méthode qui soit très proche du principe de multicast mais qui ne soit pas contrainte par l'émission de « beacons » pour ne pas rencontrer les problèmes de délai. [Fah05][Fah06a][Jac04]. Pour cela, nous avons proposé d'appliquer une méthode qui n'est pas totalement unicast, qui s'appelle « multiple unicast ».

Pour cette méthode, nous avons défini la notion d'un groupe multicast, associé à une adresse multicast, cette dernière représente un ensemble de mobiles évoluant dans le réseau et qui ont besoin de coopérer entre eux pour réaliser une tâche. Toutes les communications passent par le point d'accès qui organise les échanges entre les mobiles.

### **3.3.1.2- Concept de l'échange**

Supposons l'existence d'un ensemble de mobiles (appartenant à un ou plusieurs groupes) ayant besoin d'échanger des informations temps réel entre eux, en appliquant la méthode multiple unicast l'opération se déroulera de la façon suivante :

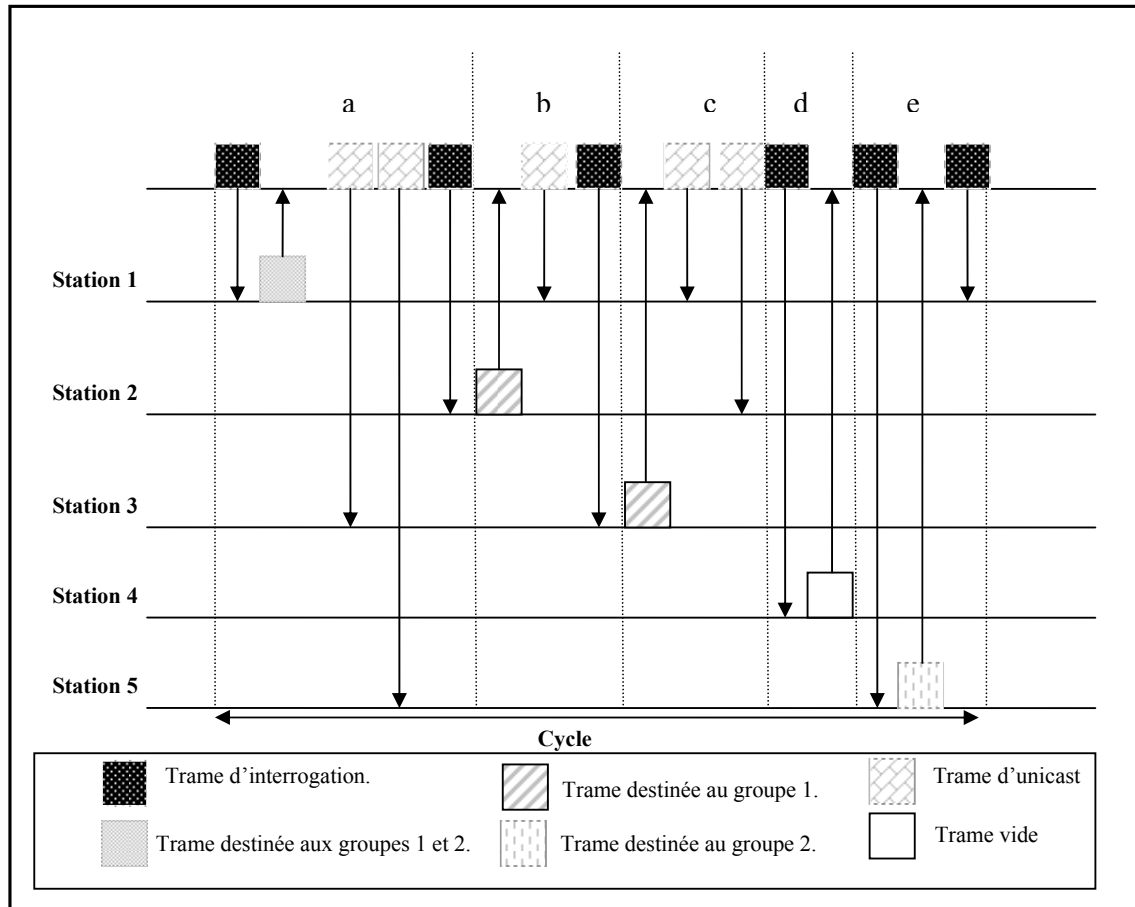
- 1- Chaque mobile peut appartenir à un ou plusieurs groupes.
- 2- Chaque point d'accès possède une table d'affiliation qui contient l'appartenance de chaque mobile à son ou ses groupes (tableau III.2).

<b>Mobile</b>	<b>Groupe</b>
Station 1	1,2
Station 2	1
Station 3	1
Station 4	-
Station 5	2

**Tableau III.2 : Exemple d'une table d'affiliation dans la méthode multiple unicast.**

- 3- Le cycle d'échange commence quand le point d'accès interroge le premier mobile de sa table d'affiliation.
- 4- Quand le premier mobile reçoit l'interrogation du point d'accès, il envoie ces informations au point d'accès.
- 5- Le point d'accès envoie la trame reçue à tour de rôle à tous les membres du ou des groupes auxquels appartient le mobile source sauf au mobile de rang (i+1) de sa table d'affiliation (mobile suivant de sa table d'affiliation) (Figure III.8 a) à qui il envoie une trame qui contient les informations et une invitation à envoyer ces informations. Dans le cas où tous les membres d'un groupe donné ont échangé leurs informations, le point d'accès interroge de nouveau le membre suivant dans sa liste d'affiliation (Figure III.8 d et e).
- 6- Dans le cas où un mobile n'appartient à aucun groupe, et quand le point d'accès l'invite à envoyer ces informations il lui répond par une trame vide. L'échange "vide" est donc nécessaire pour la constitution des groupes. (Figure III.8 d).

Cette procédure sera répétée jusqu'au dernier mobile de la table d'affiliations du point d'accès, puis traite la table d'affiliation de façon circulaire en reprenant au niveau de son premier mobile.



**Figure III. 8: Stratégie multiple unicast.**

La figure III.8 montre les échanges durant un cycle complet en utilisant la méthode multiple unicast. Dans cet exemple nous avons utilisé la table d'affiliation du tableau III.2.

### 3.3.1.3- Avantages de la méthode multiple unicast

- 1- Cette méthode minimise le nombre d'échanges de chaque cycle par rapport à la méthode unicast classique.
- 2- Par rapport au multicast classique, la méthode multiple unicast évite l'utilisation des « beacons ». Par conséquent, elle supprime le besoin d'attendre le départ du prochain « beacon » pour commencer à diffuser les informations.

Le volume de trafic échangé dans la méthode multiple unicast est plus petit que le trafic échangé dans la méthode unicast classique car seules les trames descendantes sont dupliquées; cela diminue la charge du réseau.



#### **3.3.1.4- Inconvénients de la méthode multiple unicast**

- 1- Dans cette méthode, un mobile ne sait pas si tous les membres avec lesquels il collabore ont bien reçu sa trame. Etant donné que nous utilisons des échanges élémentaires de type unicast ceci ne se produit qu'à l'expiration du crédit de répétition d'un échange élémentaire.
- 2- La méthode multiple unicast est basée sur DCF, ce qui ne nous permet pas de maîtriser précisément le temps nécessaire pour accéder au canal, nous risquons donc d'avoir des temps de cycle élevé.

#### **3.3.2- Méthode Pseudo-PCF**

##### **3.3.2.1- Principe de Pseudo-PCF**

Notre objectif est ici de réaliser un mode d'interrogation des stations proche du mode PCF décrit dans le standard IEEE 802.11. Ce nouveau mode que nous appelons Pseudo-PCF est implémenté dans le point d'accès et les stations pour gérer l'activité de transfert de données de la coopération [Lla06][Fah06a][Fah06b]. Grâce à cette nouvelle fonctionnalité greffée dans le point d'accès, les stations n'ont aucune initiative et ne doivent accéder au médium que lors d'une interrogation par le point d'accès (le canal utilisé par le point d'accès n'est pas utilisé dans les autres cellules voisines). Un autre effet induit par ce mode Pseudo-PCF est l'absence de compétition pour l'accès au médium. En effet, bien qu'il s'appuie sur le mode DCF du standard 802.11 et de la méthode d'accès CSMA/CA associée, l'accès au médium est orchestré par le point d'accès. Un mobile n'est autorisé à transmettre que lorsqu'il a reçu du point d'accès, l'invitation à le faire grâce à l'échange d'une trame. Cela évite toute compétition pour accéder au canal, en conséquence, le canal sera toujours libre quand le point d'accès ou les stations devront y accéder. Cette méthode donne au point d'accès le principe de la mémoire cache décrit avant.

##### **3.3.2.2- Fonctionnement de Pseudo-PCF**

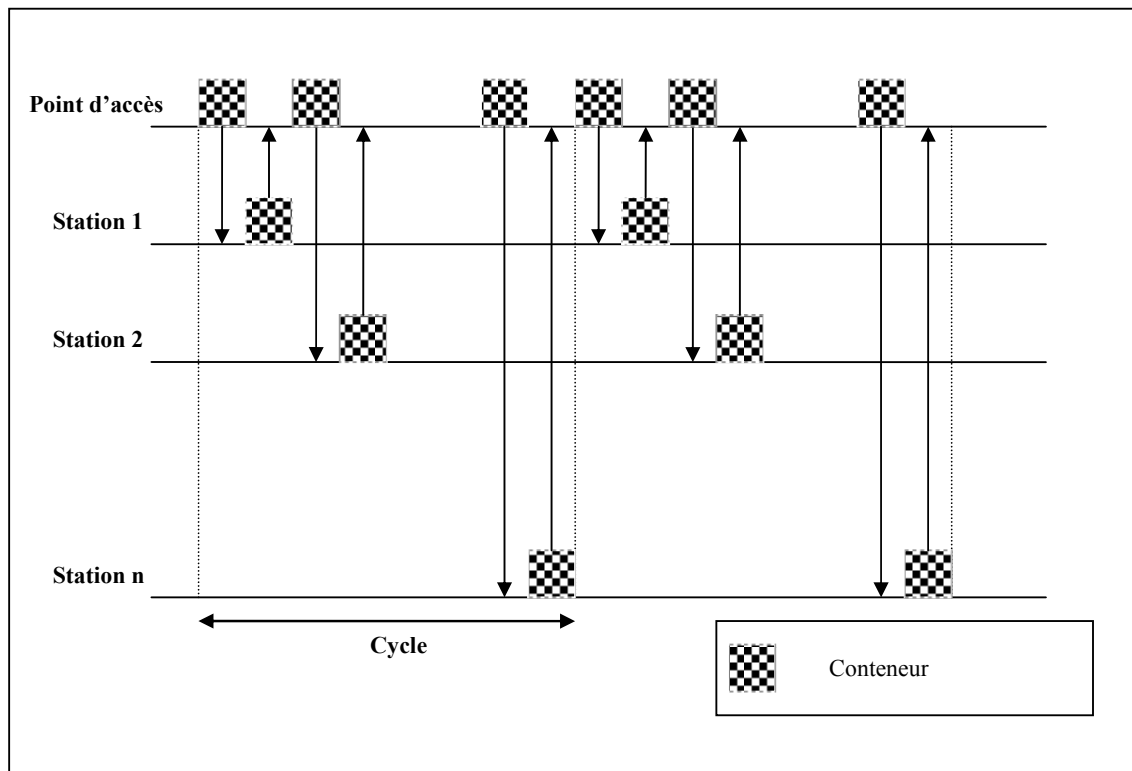
Le cycle va consister à transmettre une trame spéciale, que l'on appelle un conteneur, qui va circuler cycliquement entre le point d'accès et les mobiles de la cellule. Cette trame est, en premier lieu, destinée à faire transiter un flux d'information temps réel entre les mobiles afin que ceux-ci puissent collaborer dans leurs activités. Comme nous l'avons déjà dit à propos du projet WAVES, ce trafic temps réel sert principalement à asservir les mobiles dans leurs déplacements. Le cycle d'interrogation est du type question-réponse, on peut le décrire de cette façon :

- 1- le point d'accès interroge la première station de sa liste,

- 2- la station répond avec une trame de réponse contenant les informations nécessaires à la gestion des coopérations dans lesquelles elle est engagée, il s'agit de ses données locales de coopération,
- 3- le point d'accès interroge la station suivante de sa liste de la même façon que 2 et ainsi de suite jusqu'à la dernière station de la liste, puis un nouveau cycle d'interrogation de l'ensemble des stations de la cellule recommence.

La différence majeure entre PCF et Pseudo-PCF est que la dernière utilise l'intervalle DIFS pour séparer un acquittement et l'émission de la trame suivante (Figure III.12) alors qu'en mode PCF, durant la période sans contention, un délai plus court est respecté : SIFS ou PIFS dans le cas où une station n'a rien à émettre.

Dans cette méthode, le cycle a une durée limitée car contrairement à la méthode précédente une trame contient les informations nécessaires à toutes les coopérations dans lesquelles le mobile est engagé. Dans le cas où une station ne répond pas, le cycle est interrompu, il peut être restauré à l'échéance d'un temporisateur géré par le point d'accès.



**Figure III. 9: Stratégie Pseudo-PCF.**

Dans la méthode Pseudo-PCF une trame peut être utilisée pour échanger deux types d'information selon son contenu [Lla06][Fah06a]:

#### **a- Principe des échanges temps réel**

Le point d'accès interroge à tour de rôle l'ensemble des mobiles de sa liste et les invite à communiquer les informations relatives à leurs coopérations. Le mobile interrogé répond par les données nécessaires à ses coopérations. Ces informations sont copiées dans une structure appelée Miroir qui est mise à jour à chaque réponse des mobiles.

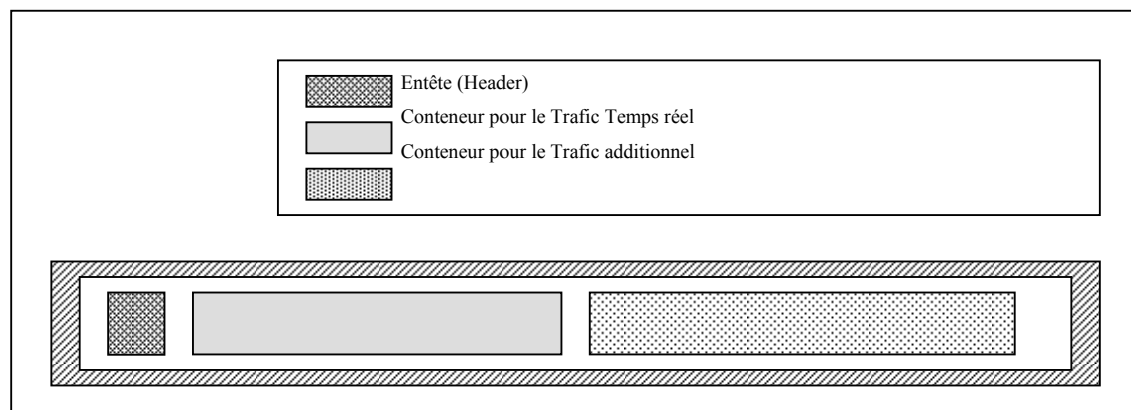
A chaque interrogation d'un mobile, la trame de requête est utilisée pour communiquer au mobile le contenu du miroir qui concerne ses coopérations. Au bout d'un cycle le multicast est donc effectif. Dans cette méthode il n'y a pas de plage de temps réservée au mode DCF comme c'est le cas dans le PCF classique.

#### **b- Principe des échanges du trafic additionnel**

Le séquençement périodique que nous venons de décrire ne doit pas être exposé aux perturbations d'un trafic additionnel venant du serveur d'application par exemple. Sachant que la longueur d'une trame n'a pas une grosse incidence sur le temps nécessaire pour la transmettre, il a été décidé de fractionner les trames émises par les mobiles en deux compartiments appelés conteneur :

- l'un pour le trafic temps réel qui est toujours utilisé ;
- l'autre pour le trafic additionnel (téléchargement FTP, reporting.....). Ce dernier est utilisé quand ce type de trafic est présent et si la séquence périodique n'est pas trop longue.

La figure (III.10) ci-dessous décrit le format de la trame :



**Figure III. 10: Procédure d'échange dans multiple unicast.**

Nous désignerons par intervalle de répétition du mode Pseudo-PCF, le temps nécessaire à l'interrogation de l'ensemble des stations en mode Pseudo-PCF que le point d'accès gère. C'est le temps requis pour qu'une station connaisse les informations des autres stations de la cellule avec lesquelles elle est engagée dans une coopération. Il définit un domaine de sécurité

permettant aux stations d'interagir avec leur environnement et d'éviter des collisions entre elles, par exemple.

### **3.3.2.3- Avantages et inconvénients du Pseudo-PCF par rapport au PCF**

- 1- Il n'y a pas de plage de temps réservée au mode DCF dans le mode Pseudo-PCF. Cette plage qui est laissée au mode DCF lorsque la méthode d'accès PCF est utilisée sert notamment à affilier de nouvelles stations au point d'accès. Cette phase n'est pas nécessaire pour le mode Pseudo-PCF car dans le projet WAVES l'affiliation des stations au point d'accès se fait à partir de l'infrastructure [Lla06][Fah06b].
- 2- Les échanges en mode Pseudo-PCF s'enchaînent en continu. Il n'y a pas de décalage entre deux intervalles de répétition du mode Pseudo-PCF.
- 3- La longueur du cycle des échanges réalisé à l'aide du mode Pseudo-PCF n'est pas fixe. Elle dépend de deux facteurs :
  - a- Du nombre de stations sous la cellule que le point d'accès doit interroger. Cette flexibilité peut aussi être un inconvénient car plus le nombre des stations augmente plus le temps de cycle pour l'interrogation de l'ensemble des stations augmente avec comme effet négatif le non respect des contraintes de temps.
  - b- De la taille de conteneur qui est fonction de la présence ou non d'un trafic additionnel.

Mais la méthode Pseudo-PCF possède des inconvénients par rapport au PCF qui sont les suivants :

- 1- Une station qui n'a pas de données à transmettre doit quand même répondre au lieu d'attendre un délai PIFS comme dans le cas du mode PCF. Néanmoins, cet inconvénient est contrebalancé par le fait que cela permet de savoir si la station est toujours accessible. Dans le cas contraire, les éléments de supervision devront être avertis de cette défaillance.
- 2- L'intervalle de répétition du mode Pseudo-PCF n'est pas spécifié en terme d'intervalle inter « beacons ». Par conséquent, des trames (venant des mobiles) viendront rompre le cycle d'interrogation des stations. Toutefois, on peut constater que suivant la longueur de la trame Pseudo-PCF qui est variable, des trames Pseudo-PCF peuvent être émises sans émission de « beacon ».
- 3- Le mécanisme permettant d'envoyer des données, d'acquitter les précédentes et d'interroger la station courante qui est pratiqué par le mode PCF ne peut pas être

exploité par le mode Pseudo-PCF puisqu'il s'appuie sur le mode DCF de 802.11 qui n'offre pas cette possibilité (ce mode acquitte systématiquement les trames dédiées à une station).

### 3.3.3- Evaluation des deux méthodes proposées

Dans cette partie une évaluation théorique du temps de transmission des trames sera faite en utilisant les méthodes Pseudo-PCF et multiple unicast:

Le tableau suivant résume les paramètres utilisés :

Débit du canal	11 Mbit/sec
Durée de transmission de l'entête physique	192 $\mu$ s
Durée de DIFS ( $T_{difs}$ )	50 $\mu$ s (standard)
Durée de SIFS ( $T_{sifs}$ )	20 $\mu$ s
Taille de la trame d'acquiescement ( $T_{ack}$ )	14 octets
Durée moyenne de Back-off ( $T_{backoff}$ )	$(CW(min)*Time\ slot)/2=310\ \mu s$ .
Taille des données temps réel/ Interrogation	758 bytes
Temps de transmission de l'entête MAC	20 $\mu$ s

**Tableau III.3 : Paramètres de calcul.**

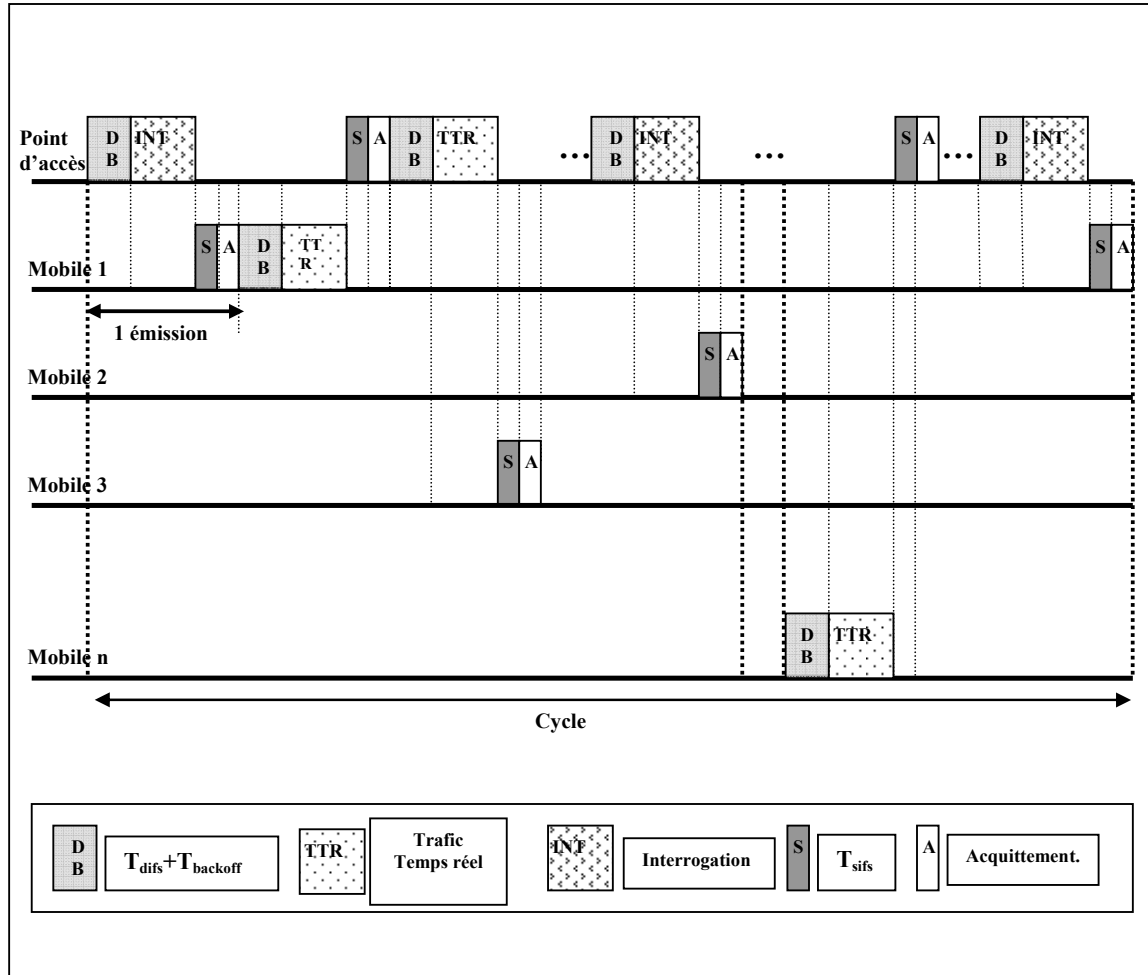
Dans ce calcul nous considérons seulement le trafic temps réel.

#### 3.3.3.1- Méthode multiple unicast

Dans cet exemple nous constatons que tous les mobiles affiliés au point d'accès appartiennent à un seul groupe (G).

Le cycle commence quand le point d'accès interroge le premier mobile de sa table d'affiliation, alors il attend un temps  $T_{difs}$ , puis si le médium est libre, il attend le temps  $T_{backoff}$  puis il émet la trame d'interrogation. A la réception de la trame d'interrogation, le mobile attend un temps  $T_{sifs}$  avant d'envoyer un acquiescement au point d'accès. Puis il attend un  $T_{difs}$  et si le médium est libre, il attend le temps  $T_{backoff}$  puis il émet la trame TTR au point d'accès qui attend un  $T_{sifs}$  avant d'envoyer un acquiescement au mobile. Maintenant, le point d'accès attend ensuite un  $T_{difs}$  puis, si le médium est libre il attend un  $T_{backoff}$  puis envoie la trame TTR à tous les mobiles du groupe auquel appartient le mobile source sauf au mobile de rang (i+1) de sa table d'affiliation (mobile suivant de la table d'affiliation) à qui il envoie une trame qui contient les informations et l'interrogation a envoyé ces informations (Figure III.11).

Cette procédure sera répétée jusqu'au dernier mobile de la liste d'affiliation du point d'accès.



**Figure III. 11: Procédure d'échange dans multiple unicast.**

#### Durée d'une seule émission

Calculons maintenant la durée d'une seule émission entre le mobile et le point d'accès ou vice versa en utilisant la méthode multiple unicast (Figure III.11).

En se référant à la figure III.11, le temps de transmission pour une seule émission ( $T_{total}$ ) est égal à :

$$T_{total} = T_{db} + T_{TTR/INT} + T_{sifs} + T_{ack} \cdot (3.4)$$

Avec:

a-  $T_{db} = T_{backoff} + T_{difs}$ .

Le tableau (Tableau III.3), nous permet de déduire que  $T_{db} = 310 + 50 = 360 \mu s$ .

b-  $T_{TTR/INT}$ : c'est le temps de transmission d'une trame trafic temps réel ou d'une interrogation au mobile pour émettre des informations. Puisque le débit du lien sans fil est égal à 11 Mbps, alors le temps de transmission d'une trame trafic réel (ou interrogation) (800 octets) est égal à 581  $\mu$ s.

Mais avec chaque émission nous avons un temps de synchronisation qui est égal à 192  $\mu$ s et un temps de transmission de l'entête MAC qui est de 20  $\mu$ s.

Alors :  $T_{TTR/INT}=581+192+20 = 793 \mu$ s.

c-  $T_{sifs}= 20 \mu$ s.

d-  $T_{ack}$ : la taille de la trame d'acquiescement est égale à 14 octets ce qui nécessite un temps de transmission de 10  $\mu$ s et comme chaque émission nécessite une durée de synchronisation égale à 192  $\mu$ s, alors  $T_{ack}=192+10=202 \mu$ s.

Dans le cas du multiple unicast, le temps de transmission pour une seule transmission ( $T_{total}$ ) est égal à :

$$T_{total}= T_{db}+ T_{TTR} + T_{sifs} +T_{ack}=1.375 \text{ ms.}$$

Si nous souhaitons un temps de cycle des échanges égal à 100ms alors le nombre de mobiles d'un même groupe coopératif sous une même cellule est égal à 9 mobiles (en se référant à la figure III.8).

### 3.3.3.2- Méthode Pseudo-PCF

La figure III.12 montre le cycle d'échanges entre les mobiles coopérants en utilisant la méthode Pseudo-PCF. Lors de la première étape le point d'accès interroge le premier mobile de la liste d'affiliation qui appartient à un groupe multicast G, attend un temps DIFS ( $T_{difs}$ ) puis, si le médium est libre, il attend le temps de Back-off ( $T_{backoff}$ ) avant d'émettre sa trame. A la réception du trafic, le premier mobile attend un SIFS ( $T_{sifs}$ ) avant d'envoyer l'acquiescement A au point d'accès.

Le premier mobile doit ensuite répondre au point d'accès par ses informations, pour cela il attend un temps  $T_{difs} + T_{backoff}$  avant d'émettre son trafic, à la réception le point d'accès attend un temps  $T_{sifs}$  et envoie un acquiescement A.

Cette procédure sera répétée avec tous les membres du groupe jusqu'à la fin du cycle (Figure III.12)

La figure suivante montre la procédure de cet échange.



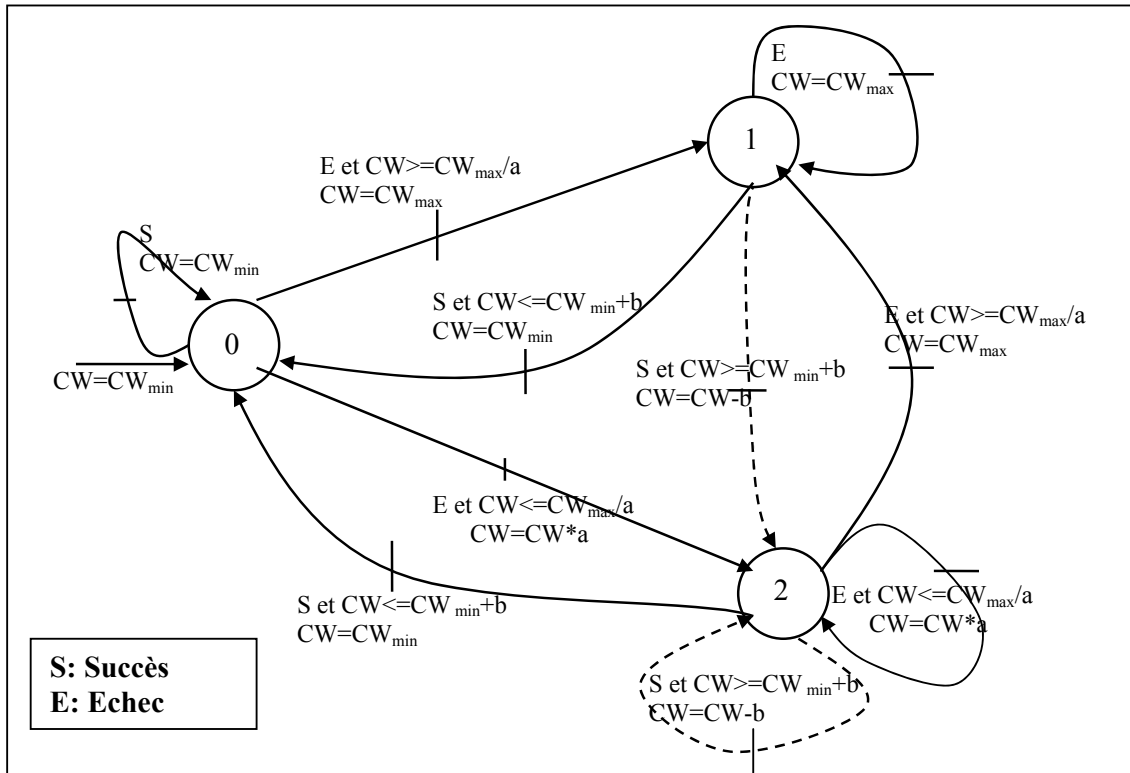


A chaque échec, la taille de la fenêtre de contention n'est plus systématiquement doublée mais elle est multipliée par une valeur  $a$ , telle que:  $1 < a < 2$ .

Dès la première retransmission nous avons donc :

$$CW = \min(a * CW, CW_{\max}) \quad (3.5)$$

L'automate donné en figure III .13 montre le fonctionnement de ce Back-off modifié :



**Figure III. 13: Graphe de Mealy représentant le Mécanisme de Back-off modifié.**

Dans ce graphe, nous avons conservé la machine de Mealy à 3 états déjà utilisée pour la figure II.5 pour décrire le mécanisme de Back-off modifié. Les différences sont mises en avant par des transitions en pointillés.

Dans ce graphe les conditions sur les arcs du graphe sont modifiées :

- En cas de succès de transmission,  $CW = CW * 2$  devient  $CW = CW * a$ ,
- En cas d'échec de transmission,  $CW = CW_{\min}$  devient  $CW = CW - b$ .

Ceci en dehors des cas limites matérialisés par les états 0 et 1.

Les deux arcs en pointillés expliquent le fait qu'en cas du succès  $CW$  ne revient pas brutalement à la valeur  $CW_{\min}$ , mais par étape itérative  $CW = CW - b$  si les succès perdurent.

Le problème ainsi posé, il reste à trouver la valeur du couple (a, b) la plus optimale possible pour WAVES.

Pour cela dans le chapitre 4, des simulations seront présentées pour plusieurs valeurs de a et de b, notre objectif étant d'évaluer la meilleure valeur pour le couple (a, b) qui corresponde à notre environnement et qui permette de minimiser le cycle d'interrogation des mobiles.

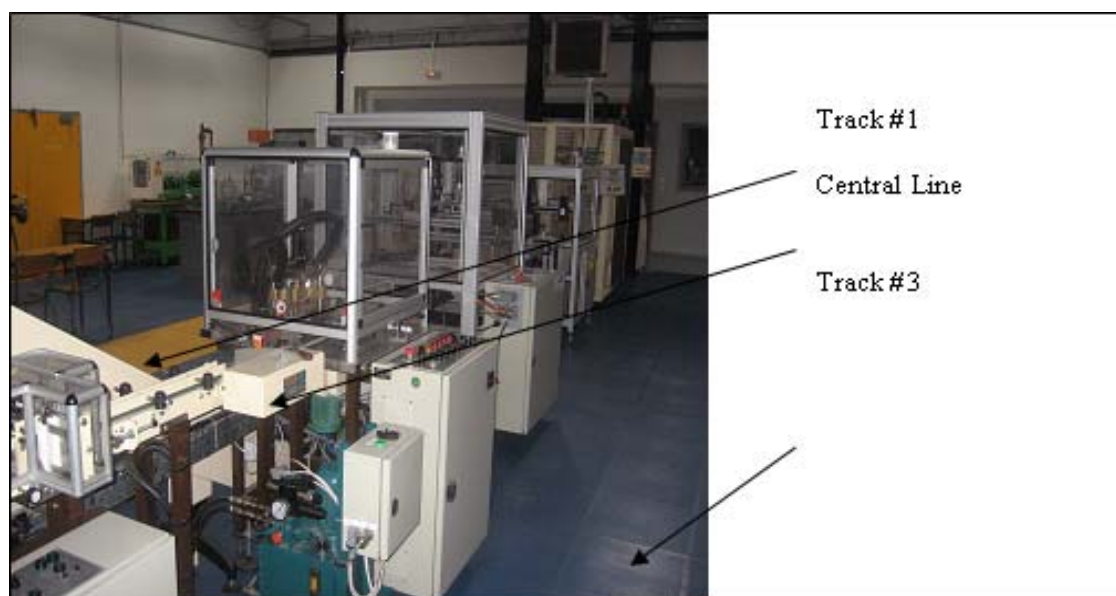
### 3.5- Modèle de propagation choisi

Dans le deuxième chapitre (paragraphe 2.1.4) nous avons décrit les modèles de propagation existants. Notre objectif ici est de trouver le modèle de propagation qui correspond au projet « WAVES ». Pour cela, des mesures ont été faites au sein de l'équipe sur un site industriel générique composé de machines servant à la production des savonnettes. L'environnement de mesures dépend des obstacles, des mouvements des autres entités mobiles et des machines qui se trouvent dans le site [Ben07].

Pour trouver le modèle de propagation le plus proche de notre environnement industriel, des simulations, sous OPNET [OPN07] et sous NS2, pour plusieurs modèles de propagations existants ont été faites.

Les résultats de mesures sont comparés aux résultats obtenus par simulation, et enfin nous avons choisi le modèle qui a donné les résultats les plus proches des mesures.

En l'absence d'un modèle de référence pour un environnement industriel de type chaîne de production, nous avons choisi une zone du déploiement qui représente une chaîne de production représentative dont une partie est illustrée figure III.14.



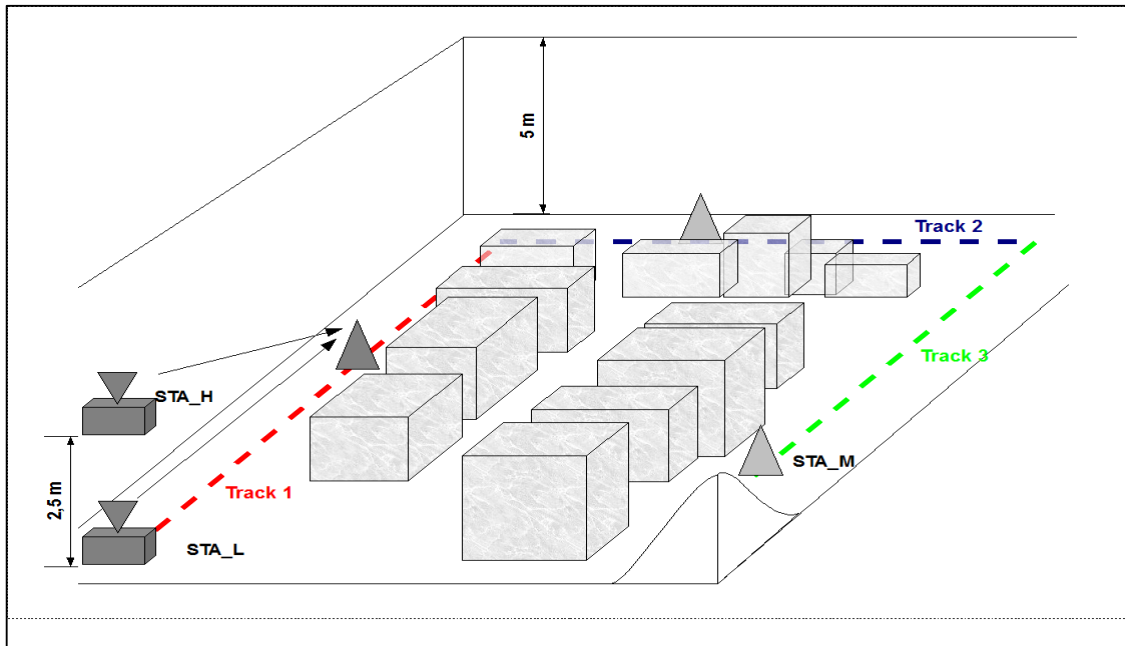
**Figure III. 14: Environnement industriel.**

Cette zone représente un secteur composé d'équipements disposés en lignes droites (Figure III.15) séparées par les voies dans lesquelles circulent les ouvriers et/ou les robots qui sont les entités mobiles exigeant des communications sans fil.

Une chaîne de production de barre de savon, utilisée pour la formation d'étudiants sur les systèmes de contrôle automatisés, sera considérée comme usine appropriée et représentative dans laquelle les mesures présentées dans la suite ont été effectuées.

Ces mesures seront employées pour ajuster le processus de modélisation des conditions de propagation et pour expliquer certains défauts de fonctionnement.

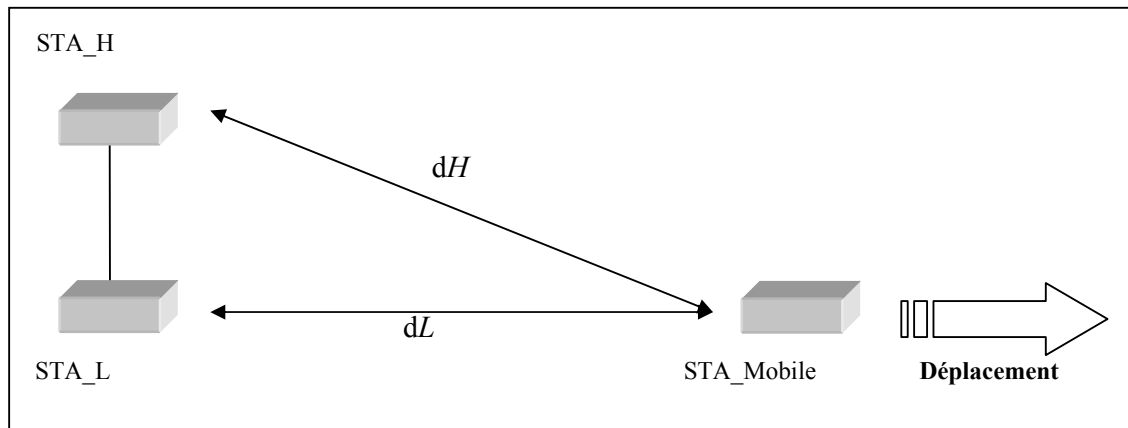
La cellule qui couvre une partie de l'usine est composée d'une ligne de production centrale et d'une ligne transversale délimitant trois voies de circulation (Track 1 et Track 3 de la figure III.14 et Track 2 de la figure III.15). Les machines de ces lignes produisent des pains de savon et les marquent.



**Figure III. 15: Ajustement des machines.**

Pour étudier les conditions de propagation, nous avons choisi de mesurer les effets du « path loss » entre 3 stations sans fils. Entre ces stations nous avons considéré deux stations fixes qui sont STA\_H et STA\_L et une station mobile (STA\_M) suivant les indications de la figure III.16. STA\_H sera positionné à une hauteur de 2.50 m du sol, cette position sera celle que pourrait avoir un point d'accès en mode infrastructure. L'une des stations STA\_L sera fixée à 50 cm du sol et dans la même verticale que la station du haut. La dernière station STA\_M sera déplacée par des pas de 1m de la station au sol, et va nous servir à mesurer les puissances

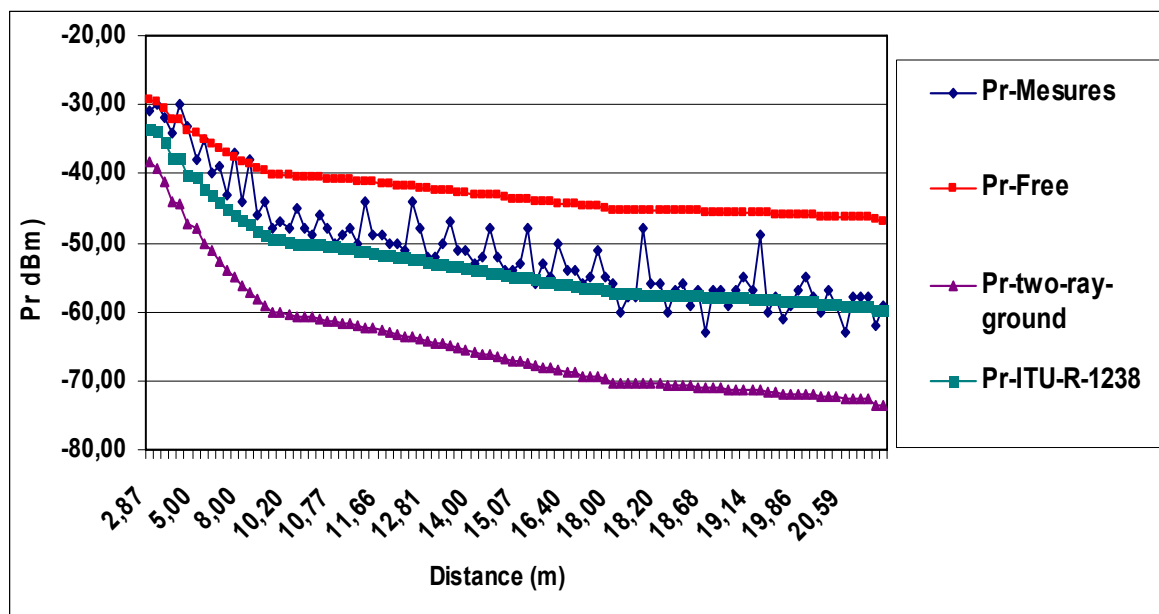
reçues des deux entités décrites auparavant (Figure III.16). La station mobile STA\_M bouge selon les trois voies track 1, track2 et track3 représentées dans la figure III.15. La trajectoire de cette station mobile représente les mouvements de l'ouvrier ou d'un robot dans l'usine.



**Figure III. 16: Dispositif de mesures.**

L'instrument de mesures utilisé a été développé à partir du " wireless tools" de Linux qui permet à une station de connaître la puissance des trames même si elles ne lui sont pas dédiées [Hp107].

A chaque période, un échange de 100 trames sera initié par STA\_H et STA\_L à destination de STA\_M. La durée de cet échange est de 10 secondes ce qui assure des échantillons différents pour chaque mesure. Pour chaque trame reçue, connaissant la puissance utilisée pour émettre, la STA\_M peut donc en déduire la perte du signal subie par la transmission.



**Figure III. 17: Perte de puissance selon la distance.**

La figure III.17 montre la perte de puissance constatée selon la distance entre STA\_H, STA\_L et STA\_M, en utilisant plusieurs types de modèles de propagation. Cette figure montre que le modèle le plus proche des conditions de propagation des applications représentées par WAVES est le modèle ITU-1238-4.

### 3.6- Choix des paramètres du modèle ITU-1238-4

Ce modèle est paramétrable, il nous faut maintenant l'affiner en fixant les valeurs de ses paramètres de façon à ce qu'il corresponde à notre milieu industriel.

Pour l'atténuation (dispersion de puissance) la formule est décrite dans le chapitre 2 (formule 2.7).

#### 3.6.1- choix de N (Coefficient d'atténuation)

Pour trouver la valeur de N, on peut se référer à la table de l'article de l'ITU [Itu05] après avoir identifié le type de site.

Fréquence	Résidence	Bureau	Commercial
900 MHz	–	33	20
1.2-1.3 GHz	–	32	22
1.8-2 GHz	28	30	22
4 GHz	–	28	22
5.2 GHz	–	31	–
60 GHz	–	22	17
70 GHz	–	22	–

**Tableau III.4: coefficient d'atténuation, N.**

En regardant les différentes tables, on s'aperçoit que le cas le plus défavorable décrit dans la première partie de l'article de l'ITU est un environnement de bureau avec un  $N = 30$  pour 2 GHz ce qui nous autorise à prendre  $n = 3$  si nous considérons que nous nous adressons à des environnements comparables.

Nous sommes donc en train de retenir une loi de dispersion en  $1/d^3$ . Dans notre cas, il n'y pas lieu de tenir compte du facteur d'étages car on peut supposer que le point d'accès (la station de base) et les mobiles évoluent à un même niveau (de l'entrepôt, du bâtiment,...). Dans notre cas, le facteur  $L_f$  disparaît donc.

#### 3.6.2- Choix de l'écart type

D'après le tableau III.5 issu de [Itu05] pour le choix concernant la composante aléatoire du modèle, nous avons décidé de prendre 10 dB comme « écart type » compte tenu de l'environnement industriel de WAVES.

Fréquence (GHz)	Résidence	Bureau	Commercial
1.8-2	8	10	10
5.2	–	12	–

**Tableau III.5 : choix de « l'écart type ».**

Nous avons donc fixé les trois composantes essentielles de notre modèle (n, la loi de la composante aléatoire et la valeur de son écart type)

Ce qui nous donne :

$$L_{\text{total}} = 20 \log_{10} f + 30 \log_{10} d - 28 + \sigma(0,10) \text{ dB} \quad (3.6)$$

### Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes facettes de notre contribution. Nous avons parlé ensuite du modèle de propagation choisi, des méthodes d'accès proposées et de la modification de l'algorithme de Back-off de CSMA/CA. Dans le chapitre suivant, nous allons décrire les simulations faites et les résultats obtenus pour évaluer les méthodes proposées dans ce chapitre.

Le tableau suivant montre les solutions proposées pour résoudre les problèmes des méthodes et des modèles cités dans le tableau II.9.

Méthodes ou modèles classiques	Problèmes	Solution
Modèle de propagation de base (Free space)	C'est un modèle idéal et il n'est pas compatible avec le domaine industriel.	Justification et implémentation du modèle ITU.
CSMA/CA	Le délai de transmission augmente d'une valeur très grande quand la charge de la cellule augmente.	Modification de l'algorithme de back-off Standard BEB.
BEB	Pas adapté aux applications qui ont besoin des délais de transmission faible et surtout quand la charge de la cellule augmente	
Echange (via réseau 802.11) entre les stations qui ont besoin de coopérer et qui utilise l'unicast classique	Le nombre des échanges est très grand, ce qui charge la cellule.	Proposition de nouvelles méthodes qui donnent au point d'accès la fonction du mémoire cache.
Echange (via réseau 802.11) entre les stations qui ont besoin de coopérer et qui utilise le broadcast et multicast.	La présence des beacons augmente le temps nécessaire à la diffusion.	

**Tableau III.6 : Solutions proposées pour résoudre les problèmes des méthodes et des modèles cités dans le chapitre 2.**



# Chapitre 4

## **Évaluation par simulation et résultats obtenus**



## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles et les résultats des simulations faites pour le modèle de propagation des ondes radio en milieu industriel et pour les méthodes d'échanges et Back-off présentées dans le chapitre précédent.

Pour réaliser ce travail nous allons développer les points suivants :

- Le choix, la description et les caractéristiques du simulateur;
- L'implémentation et la validation (par comparaison avec d'autres résultats obtenus par mesure) du modèle de propagation ITU-1238 retenu pour un environnement industriel;
- La simulation des méthodes multiple unicast et Pseudo-PCF, proposées dans le chapitre 3 et la discussion des résultats obtenus;
- La simulation de l'implémentation d'un nouvel algorithme de Back-off et sa comparaison avec le BEB classique.

### **4.1- Le simulateur utilisé**

#### **4.1.1- Choix du simulateur**

Parmi l'ensemble des moyens permettant de simuler le comportement des systèmes de communication, il existe deux outils principaux de simulation : OPNET et NS2.

Le logiciel OPNET permet de décrire de façon précise les caractéristiques des médiums de communication et prend en considération l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles et topologiques d'un réseau notamment sans fil. De plus, cet outil fournit un modèle rigoureux pour la description du comportement du médium radio.

Cet outil a été parmi les premiers outils de simulation de réseaux disponibles et reste un des outils de référence dans ce domaine. Il appartient à une famille de logiciels développée par la société MIL3. Cette société est spécialisée dans la mise en œuvre de logiciels de modélisation, de simulation et d'analyse de performances des réseaux de communication et de systèmes répartis.

OPNET utilise un modèle hiérarchique s'appuyant sur des frontières physiques et fonctionnelles permettant de décrire de façon précise les topologies, les flux échangés (données/contrôles) dans un système de communication. Ce modèle comporte trois niveaux de description correspondant chacun à un modèle séparé. Pour chaque niveau, l'utilisateur peut proposer son modèle ou utiliser un des modèles prédéfinis dans OPNET. L'environnement OPNET permet la modélisation et la simulation de réseaux de communication grâce à ses bibliothèques de modèles (routeurs, commutateurs, stations de travail, serveurs, ...) et de protocoles (TCP/IP, FTP, FDDI, Ethernet, ATM, ...). Le module

Radio OPNET permet la simulation des réseaux de radiocommunication : hertzien, téléphonie cellulaire et satellitaire [Opn07].

Network Simulator 2 ou « NS2 » est un simulateur de réseau orienté objet à événements discrets permettant l'étude et la conception de protocoles pour les réseaux d'ordinateurs. Il propose plusieurs facilités pour la simulation des protocoles basés sur TCP, le routage et la multi-distribution (broadcast et multicast) dans les réseaux (avec ou sans fil). Ce simulateur est un logiciel libre à code source ouvert. NS2 développé en C++ fait partie du projet VINT (Virtual InterNetwork Testbed) qui est un effort commun mené par l'Université de Berkeley, l'USC/ISI (University of Southern California's Information Sciences Institute), le LBL (Lawrence Berkeley national Laboratory) et Xerox PARC. Il est supporté par le DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [Ane99][Ns07][Ns06]. Il utilise comme interface utilisateur un interpréteur OTCL. A travers ce langage, l'utilisateur peut décrire les conditions de la simulation : topologie du réseau, caractéristiques des liens physiques, protocoles utilisés, communications réalisées, etc. L'utilisateur peut aussi créer des nouveaux objets en C++ et les utiliser ensuite dans NS par instanciations avec OTCL, les deux langages C++ et OTCL ont tous les deux des hiérarchies très proches l'une de l'autre.

En NS2 plusieurs bibliothèques sont disponibles et répondent à certains besoins spécifiques à la simulation des réseaux sans fils et les communications « multicast ».

Une comparaison sommaire entre NS2 et OPNET est donnée dans le tableau IV.1. Des comparaisons plus approfondies ont fait l'objet de nombreuses publications dont [Luc03] :

	<b>Network Simulator (NS2)</b>	<b>OPNET</b>
Gratuit	Oui	Oui pour les universitaires
Open source	Oui	Non
Langages utilisé	C++, OTCL	C
Modélisation du multicast	Oui	Oui
Modélisation du sans fil	Oui	Oui
Modélisation des nouveaux modèles de propagation	Oui	Oui
Spécification des nouveaux protocoles	Oui	Oui

**Tableau IV.1: Comparaison entre NS2 et OPNET.**

Dans notre travail nous avons adopté NS2 pour les raisons suivantes :

- sa flexibilité
- la disponibilité de son code

De plus, l'équipe Réseaux et Protocoles souhaitait continuer à développer parallèlement les deux compétences NS2 et OPNET au sein de l'équipe, ce qui a constitué une raison supplémentaire pour retenir NS2 pour ce travail alors qu'OPNET était l'outil de simulation pour d'autres sujets de thèse [Ben07].

Avant de présenter les modèles de simulation, décrivons les entités communicantes utiles pour notre travail.

#### **4.1.2- Caractéristiques d'une entité communicante sous NS2**

Le nœud (entité communicante) constitue l'élément de base de notre modèle. Un nœud dans NS2 est une classe définie dans OTCL, qui a une adresse et qui contient trois entités : le « classifier », le lien et l'agent.

##### **4.1.2.1- Le Classifier**

La fonction d'un nœud est d'examiner des champs du paquet reçu, et plus précisément, l'adresse source et l'adresse destination. Selon ces valeurs, le nœud envoie ce paquet sur ses interfaces de sortie (Figure IV.1). En NS2, ceci est effectué par un objet qui s'appelle « classifier ». Il existe plusieurs types de classifier qui sont utilisés pour différents buts :

- « address classifiers » : il est utilisé pour traiter les paquets unicast, son rôle est de sélectionner les paquets adressés directement au nœud, et de choisir le lien vers le prochain nœud ;
- « port classifier » : son rôle est de sélectionner l'agent auquel le paquet est destiné ;
- « multicast classifier » : il est utilisé pour classifier les paquets multicast.

##### **4.1.2.2- Le lien**

Il est utilisé pour relier les nœuds (figure IV.1). Un lien est défini par plusieurs paramètres comme : sa bande passante, le point d'entrée, la durée de vie de chaque paquet, etc. NS2 présente plusieurs types de liens, ainsi on peut distinguer des liens unidirectionnels ou bidirectionnels, des liens filaires et des liens non filaires pour modéliser les réseaux sans fils.

##### **4.1.2.3- L'agent**

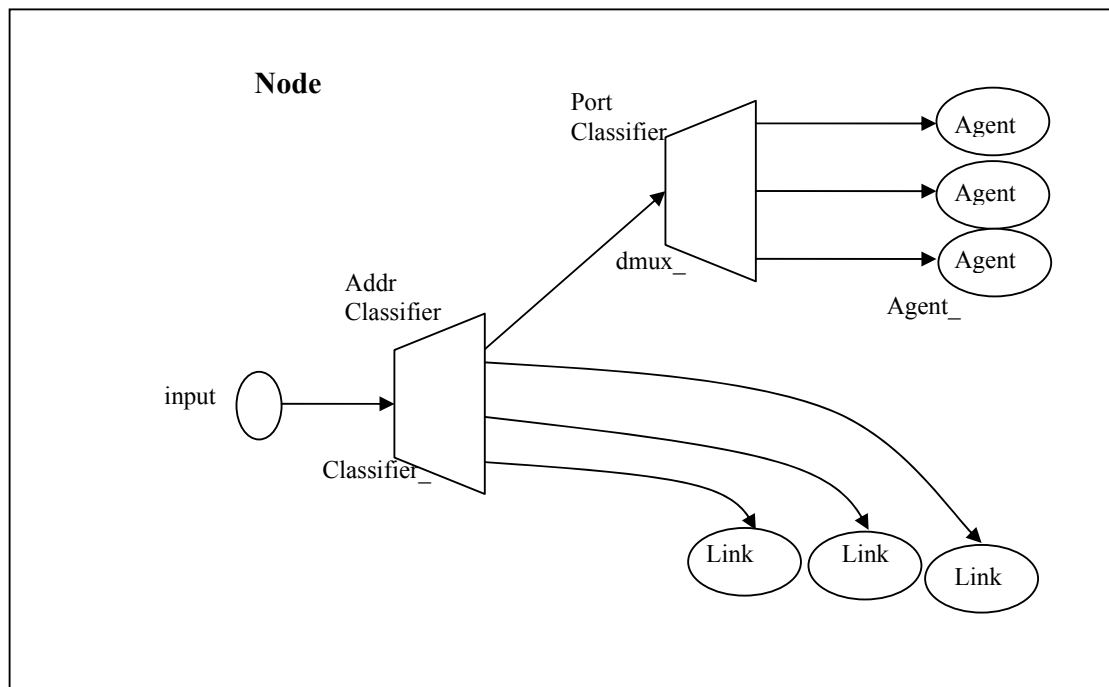
Les agents représentent des points terminaux, là où des paquets de couche réseau sont construits ou consommés. Ces agents constituent le troisième composant du nœud. Dans NS2,

le rôle de l'agent est de fournir l'adresse de destination, les fonctions pour générer les paquets et l'interface à la classe application (Figure IV.1).

Dans NS2 il existe plusieurs types d'agents, chacun a un rôle spécifique :

- agent TCP : pour émettre un trafic TCP ;
- agent UDP : pour émettre un trafic UDP ;
- agent TCPSink : pour la réception du trafic TCP ;
- agent NULL : pour la réception des paquets UDP.

La figure IV.1 représente les entités existantes dans un nœud et les liens entre ses entités.



**Figure IV. 1: Schéma d'un nœud dans NS2 [Ns06].**

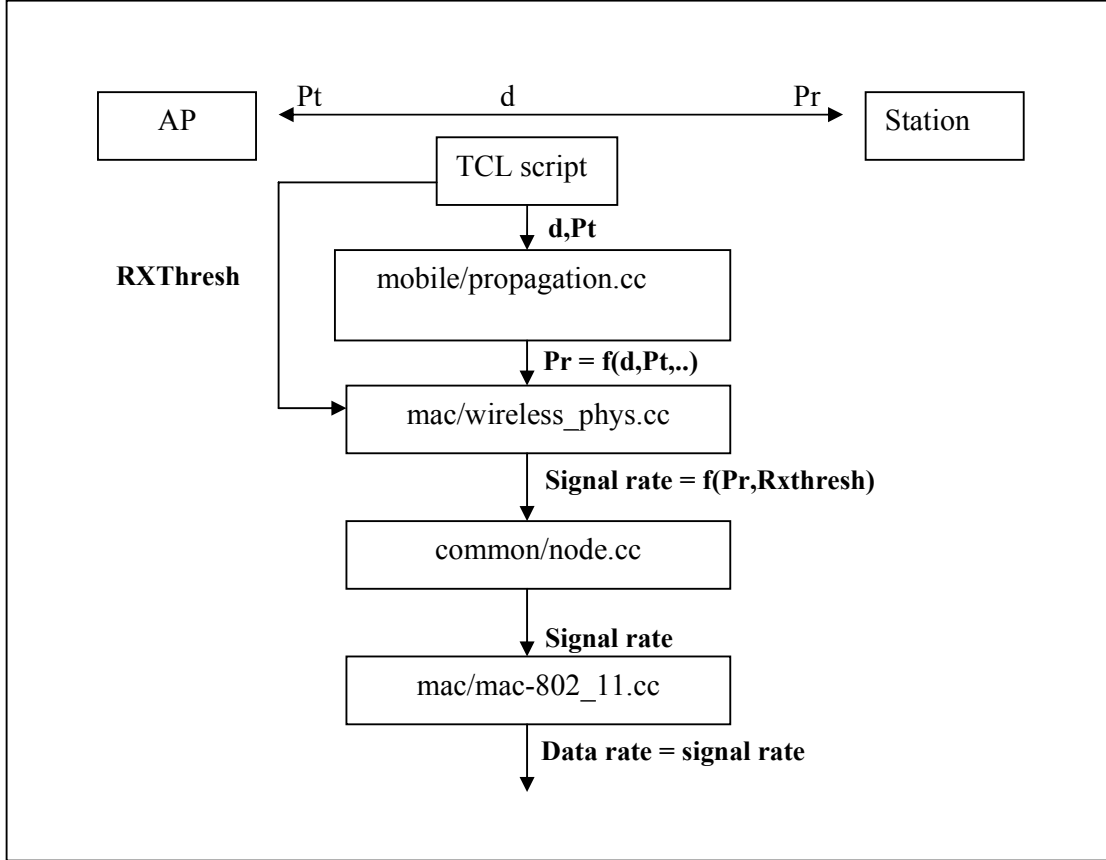
#### 4.2- Implémentation du modèle ITU1238 sous NS2

Sous NS2, il existe plusieurs modèles de propagation :

- Free space;
- Shadowing;
- Two-ray-ground;
- etc.

Le modèle utilisé par défaut est le « Free space ». Il exprime sous la forme du Path Loss la relation entre la puissance reçue  $P_r$  et celle transmise  $P_t$ . Cette relation est donnée par l'équation (2.1)

La figure IV.2 montre les différentes variables utilisées par le modèle ainsi que les fichiers et les fonctions C associées [Loh07]. Ces fichiers et ces fonctions sont décrits dans l'annexe B.



**Figure IV. 2: Prise en compte du modèle de propagation sous NS2 [Loh07].**

Afin d'implémenter le modèle ITU qui correspond à notre contexte de travail, nous avons modifié le modèle « Free space » en remplaçant l'équation (2.1) par l'équation du modèle ITU1238 que nous avons décrite et retenue dans le chapitre 2 :

$$\text{PathLoss} = 20 \log_{10} f + 30 \log_{10} d - 28 + \sigma \text{ db} \quad (2.7)$$

Pour faire cela dans NS2, nous avons modifié le fichier `mobile/propagation.cc` et surtout la fonction `propagation Friis()`. Dans cette fonction, nous avons remplacé l'équation du « Free space » par l'équation 2.7.

### **4.3- Description des simulations réalisées**

Cette partie est consacrée à la description des différentes simulations réalisées. Ainsi nous distinguerons cinq grandes étapes de simulation :

- simulation du modèle de propagation;
- simulation pour estimer la taille optimale de la cellule;
- simulation de la méthode multiple unicast;
- simulation de la méthode Pseudo-PCF;
- simulation du Back-off.

#### **4.3.1- Démarche pour la validation du modèle de propagation**

Afin de valider le modèle de propagation (ITU1238), nous avons choisi une démarche qui consiste à comparer nos résultats de simulation avec :

- ceux d'un travail fait en parallèle avec un autre simulateur;
- mais surtout avec des mesures de puissance faite sur le site dont le choix a été justifié en 3.5.

Nous allons donc décrire la façon dont nous avons réalisé cette simulation puis nous comparerons nos résultats à des résultats obtenus par des simulations faites en utilisant le simulateur OPNET et à des résultats obtenus par une campagne de mesures sur un site de fabrication de savonnettes (voire chapitre 3) [Ben07]. Cette démarche permet d'ajuster la valeur des coefficients du modèle de propagation jusqu'à ce que la comparaison montre leur pertinence.

L'objectif de cette étape de simulation est de valider notre implémentation du modèle de propagation sous NS2 en comparant  $Pr = f(d)$  à des mesures sur site.

Dans un premier temps, il nous faut parler du modèle de simulation utilisé et de la manière dont nous avons configuré les entités communicantes utilisées dans cette simulation.

##### **4.3.1.1- Modèle de simulation**

La figure IV.3 décrit le modèle de simulation et les paramètres de configuration. Dans cette simulation nous avons besoin de plusieurs entités communicantes qui sont l'AP (Access Point) et les nœuds mobiles.

Ce modèle est composé d'une seule cellule et le modèle de propagation utilisé est l'ITU1238 déjà expliqué.

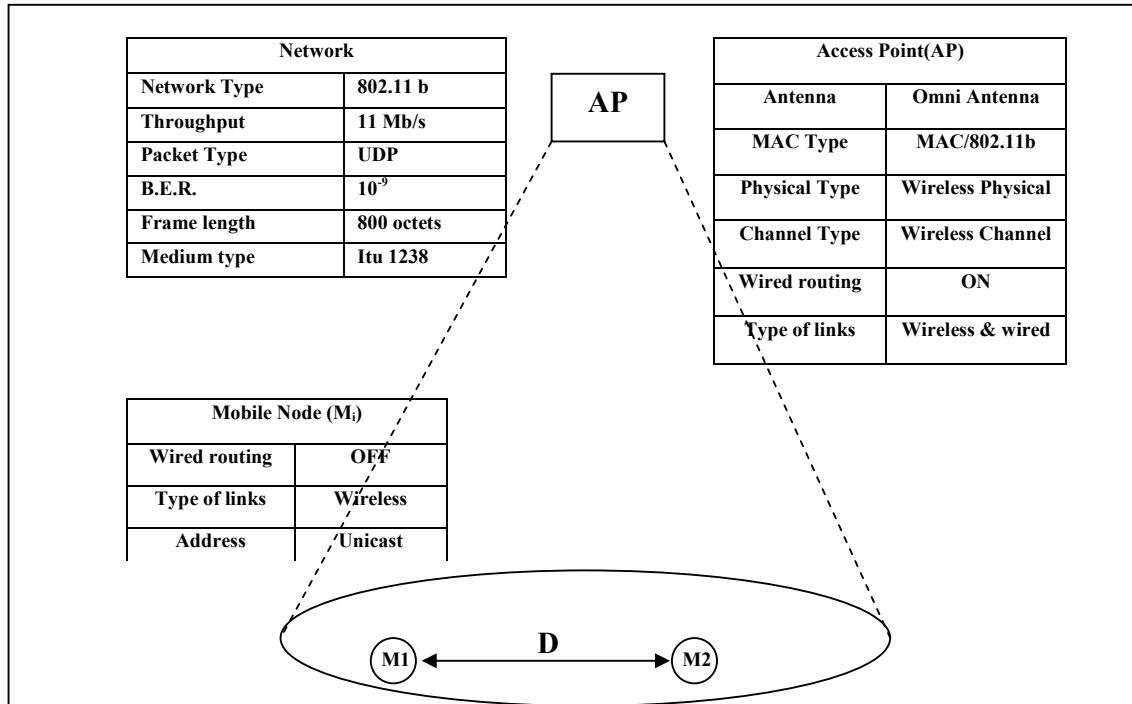


Figure IV. 3: Modèle de simulation.

Dans cette figure, nous trouvons le point d'accès et deux nœuds mobiles qui bougent dans la cellule de l'AP. Nous avons déjà indiqué les paramètres utilisés pour configurer l'AP, les nœuds mobiles et le réseau (débit, type et longueur du paquet, type des liens, adressage,...).

#### 4.3.1.2- Configuration des entités communicantes

##### a- Configuration du point d'accès

La station de base a été configurée comme suivant (Figure IV.4)

```
$ns_node-config -adhocRouting DSDV
```

```
-llType LL //Type de la couche LL
-macType Mac/802_11\ // type de la couche MAC
-ifqLen 800\ // longueur de la queue
-antType Antenna/OmniAntenna\ // type d'antenne
-phyType Phy/WirelessPhy\ // type de couche physique
-channelType Channel/WirelessChannel\ // type de la canal
-wiredRouting ON\ // pour le lien filaire avec les autres AP.
```

Dans cette énumération nous trouvons les configurations de base de l'AP. (Type de couche MAC et physique, type d'antenne, ...).

La figure IV.4 décrit les entités (agents, liens, classifieurs) utilisés pour l'AP.

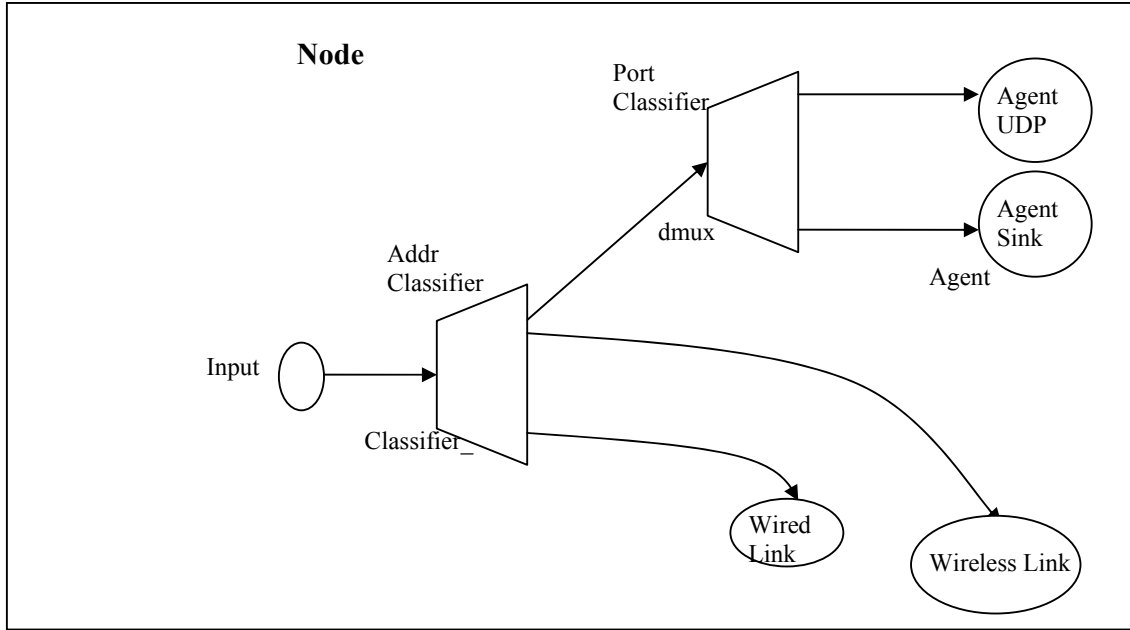


Figure IV. 4: Schéma de la station de base [Ane99].

#### b- Configuration des nœuds mobiles

Les nœuds  $M_i$  bougent dans la cellule de la station de base à laquelle ils sont attachés. Chaque nœud a une adresse unicast et échange des paquets avec les autres mobiles via la station de base. Dans chaque nœud il existe un seul lien sans fil mais il y a deux agents (Figure IV.5) :

- Un agent UDP pour envoyer les paquets UDP (car dans notre cas, nous utilisons seulement le protocole UDP) ;
- Un agent NULL pour recevoir les paquets UDP.

Ces nœuds évoluant dans la cellule d'un point d'accès à laquelle ils sont attachés, ils se modélisent conformément à la figure IV.5.

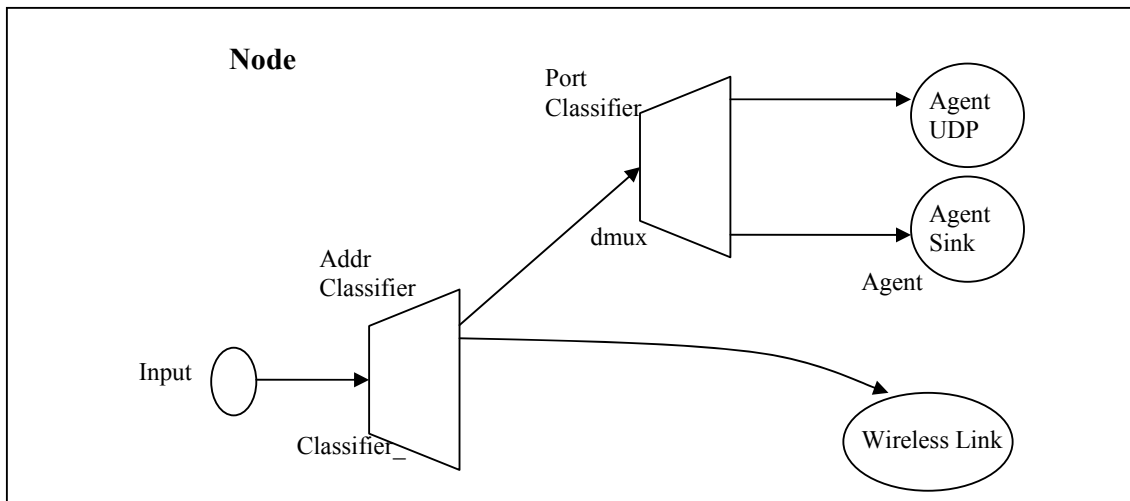


Figure IV. 5: Schéma du nœud mobile [Ane99].



### c- Paramètres généraux

Les paramètres généraux de cette simulation sont donnés dans le tableau suivant. Les paramètres ont été choisis pour que le modèle de simulation soit compatible avec les mesures faites.

Taille de paquets	800 octets
Puissance d'émission	100 mW
seuil de réception	-82dBm
seuil de sensibilité	-95dBm

**Tableau IV 2: Paramètres de simulation.**

#### 4.3.1.3- Scénario de la simulation

Dans cette simulation, nous avons pris le même scénario qui a été défini pour les mesures (chapitre 3 partie 3.5). Nous considérons trois stations, deux fixes (la première est placée à une hauteur de 2.5 m du sol et l'autre est fixée à 50 cm du sol et à la verticale de la première) et une station mobile. La station mobile sera déplacée en s'éloignant des deux stations fixes. A chaque période les stations fixes envoient un échange de 100 trames vers la station mobile. Pour chaque trame reçue, connaissant la puissance utilisée pour émettre, la station mobile (de la figure III.16) peut donc en déduire la perte du signal subie par la transmission.

#### 4.3.1.4- Résultats obtenus par la simulation du modèle de propagation implémenté

Dans cette partie, nous commençons tout d'abord par valider l'implémentation du modèle de propagation, ensuite nous calculerons la meilleure taille de la cellule qui correspond au modèle de propagation implémenté.

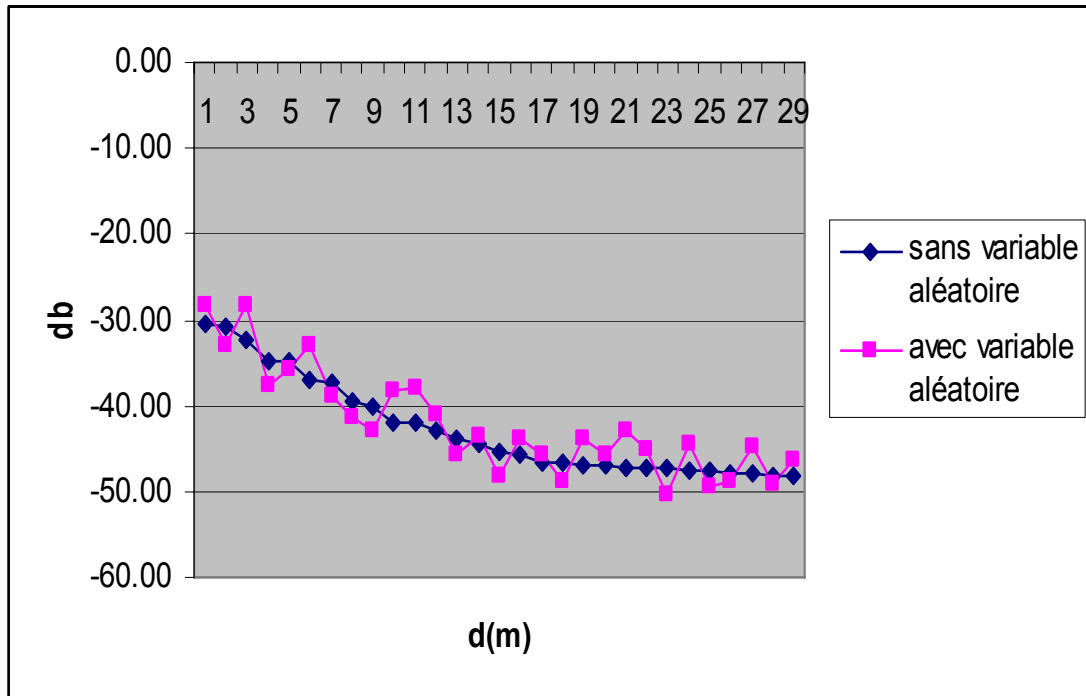
#### Validation du modèle de propagation

La validation dans cette partie consiste à comparer les résultats obtenus par simulation avec d'autres obtenus soit par simulation avec le simulateur « OPNET » soit par des mesures sur un site expérimental [Ben07]. Si ces résultats sont similaires alors nous pourrions dire que notre implémentation a été faite avec succès. Après la validation nous pourrions utiliser ce modèle de propagation pour déterminer par simulation les limites ou la taille de la cellule correspondant à ce modèle.

Les résultats de la première simulation faite donnent la moyenne de la perte de la puissance (calculée par la station mobile) par rapport à la distance parcourue par le signal. Les résultats de cette simulation sont décrits dans la figure IV.6.

Cette figure présente la perte de la puissance par rapport à la distance entre deux stations d'une même cellule dans 2 cas :

- en utilisant la variable aléatoire  $\sigma$  de l'équation 2.7 ;
- en négligeant la variable aléatoire  $\sigma$  de l'équation 2.7.

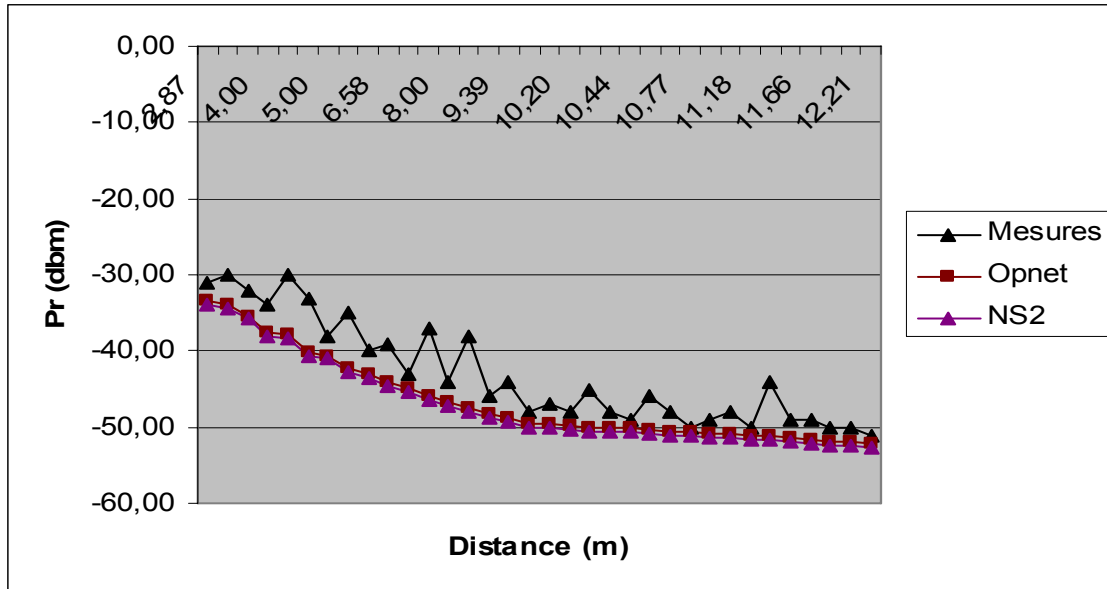


**Figure IV. 6: Perte du signal en fonction de la distance.**

Pour la comparaison, nous allons considérer la perte de la puissance sans l'aspect statistique du modèle, c'est-à-dire en négligeant la variable aléatoire  $\sigma$  de l'équation (2.7) du chapitre 2. Pour valider notre modèle de propagation, nous sommes amenés à comparer les résultats obtenus par simulation sous NS2 :

- à d'autres résultats obtenus par simulation en utilisant le simulateur OPNET. Ces simulations sont faites dans les mêmes conditions et en utilisant les mêmes modèles de simulation et de propagation choisis pour NS2 ;
- avec des mesures faites sur un site représentatif [Ben07]. Ces mesures ont été faites au sein de l'équipe pour un site industriel générique composé de machines servant à la production des savonnettes (partie 3.5).

La figure IV.7 montre l'atténuation déduite des mesures de la valeur de la puissance reçue par rapport à la distance (courbe la plus en dents de scie), et les valeurs de l'atténuation obtenues par simulation (OPNET et NS2).



**Figure IV. 7: Résultats obtenus par OPNET, NS2 et mesure.**

Comme nous avons dit, notre but est de comparer les résultats obtenus par NS2, OPNET et par mesure. Valider le modèle revient à considérer la distribution de la différence entre la courbe obtenue par NS2 et l'ensemble des mesures faites sur le site. Si la moyenne de cette distribution est proche de zéro et si l'écart type est de l'ordre de grandeur des écarts types suggérés par l'ITU, nous considérerons que ce modèle est valide.

L'ensemble des courbes que nous avons comparées correspond à ces critères, nous pouvons dire que l'implémentation du modèle de propagation (ITU) sous NS2 est valide et que son implémentation a été correctement réalisée.

Dans la suite c'est donc ce modèle qui sera utilisé pour les autres simulations afin de tenir compte des conditions de propagation spécifiques à notre environnement.

#### 4.3.2- Simulation de la taille optimale de la cellule en utilisant le modèle ITU

Puisque la taille d'une cellule varie avec les conditions de propagation, cette taille n'est pas facile à « mesurer » dans un site occupé par des chaînes de production. Nous allons utiliser le modèle de propagation que nous venons de retenir (le modèle ITU1238), dans une simulation qui nous permettra de déterminer la taille de la cellule.

##### 4.3.2.1- Modèle de simulation

Pour ceci, nous utilisons le même modèle et les mêmes configurations déjà présentés pour la première simulation (avec les deux nœuds mobiles et l'AP) en modifiant le scénario de la simulation.

#### 4.3.2.2- Scénario de la simulation

Dans ce scénario, nous considérons deux stations l'une fixe et l'autre mobile. La station mobile avance à une vitesse représentative pour des robots mobiles (vitesse d'un piéton) et à chaque fois que  $x$  mètres ont été parcourus, elle envoie (via l'AP) une rafale de  $N$  trames à destination de la station fixe. A la réception la station fixe compte le nombre des trames reçues.

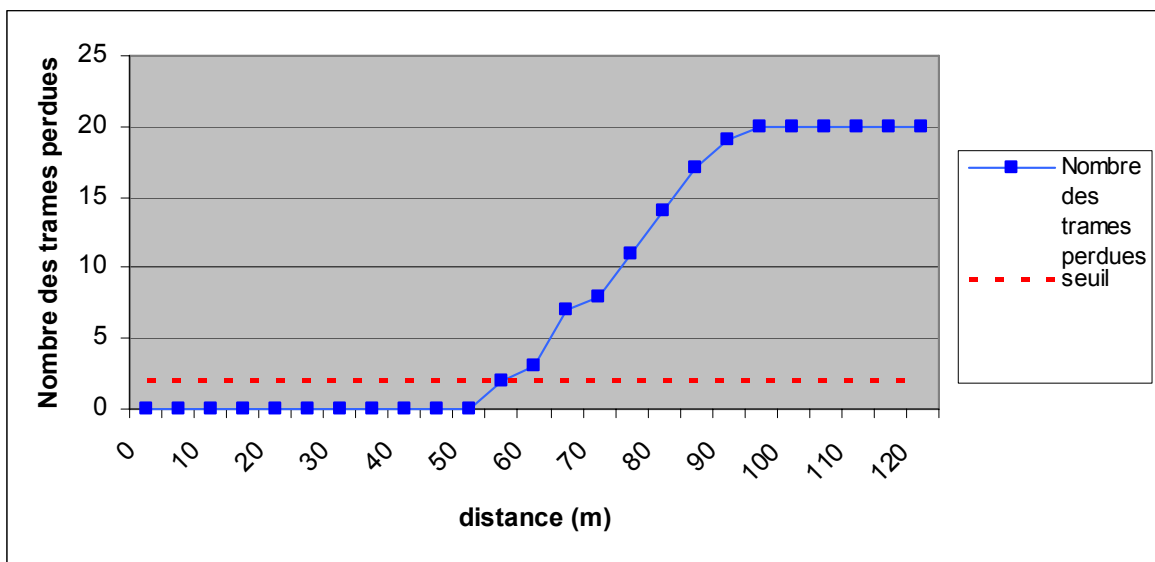
Pour déterminer la taille de la cellule, nous allons considérer qu'un lien radio reste opérationnel si le taux d'erreur trame (FER : Frame Error Rate) est inférieur ou égal à un seuil que nous avons choisi arbitrairement à 10 %.

#### 4.3.2.3-Détermination de la taille de la cellule

Comme nous l'avons déjà noté, la taille de la cellule est associée au modèle de propagation utilisé. Par conséquent, après la validation de notre modèle de propagation sous NS2 nous l'avons utilisé pour trouver le rayon optimal de la cellule qui lui correspond. Dans la suite des simulations, les mobiles seront contraints de rester dans cette cellule en respectant cette taille de cellule dans leurs déplacements.

Pour cela, il est intéressant de déterminer le pourcentage des trames reçues en fonction de la distance.

La figure suivante montre le nombre moyen de trames perdues en fonction de la distance entre le mobile et le point d'accès quand le  $x$  et le  $N$  que nous venons d'introduire ont été respectivement fixés à 5 m et 20 trames.



**Figure IV. 8: Nombre de trames perdues par rapport à la distance.**

Comme nous l'avons déjà précisé, le taux de perte admissible que nous avons choisi est égal à 10 %. Ceci correspond à un seuil de 2 trames perdues parmi 20. La figure IV.8 montre un

nombre de perte moyen en fonction de la distance, elle permet de déterminer que la cellule correspondant à nos conditions de propagation a un rayon de 55 m.

Cette taille optimale sera utilisée dans toutes les simulations présentées dans ce chapitre.

### 4.3.3 - Simulation des méthodes d'échanges

Dans cette partie nous allons présenter les simulations des méthodes d'échanges proposées pour minimiser le temps de cycle entre les mobiles.

Pour cela nous devons faire les simulations (en utilisant le modèle de propagation implémenté dans la partie précédente) pour deux méthodes d'échanges proposées qui sont « multiple unicast » et Pseudo-PCF.

#### 4.3.3.1- Objectif de la simulation

Notre but dans cette étape est d'évaluer le temps nécessaire (temps de cycle  $T_{multicast}$ ) pour que la diffusion à tous les membres d'un même groupe soit réalisée. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent il nous faut trouver les bornes minimale A et maximale B du temps

$T_{multicast}$  :

$$A < T_{multicast} < B$$

Pour ceci, nous devons effectuer les simulations des deux méthodes « multiple unicast » et « Pseudo-PCF ».

#### 4.3.3.2- Modèle commun utilisé dans toutes les simulations des méthodes d'échanges

Le modèle de simulation utilisé pour simuler ces deux méthodes d'échanges est présenté dans la figure IV.9.

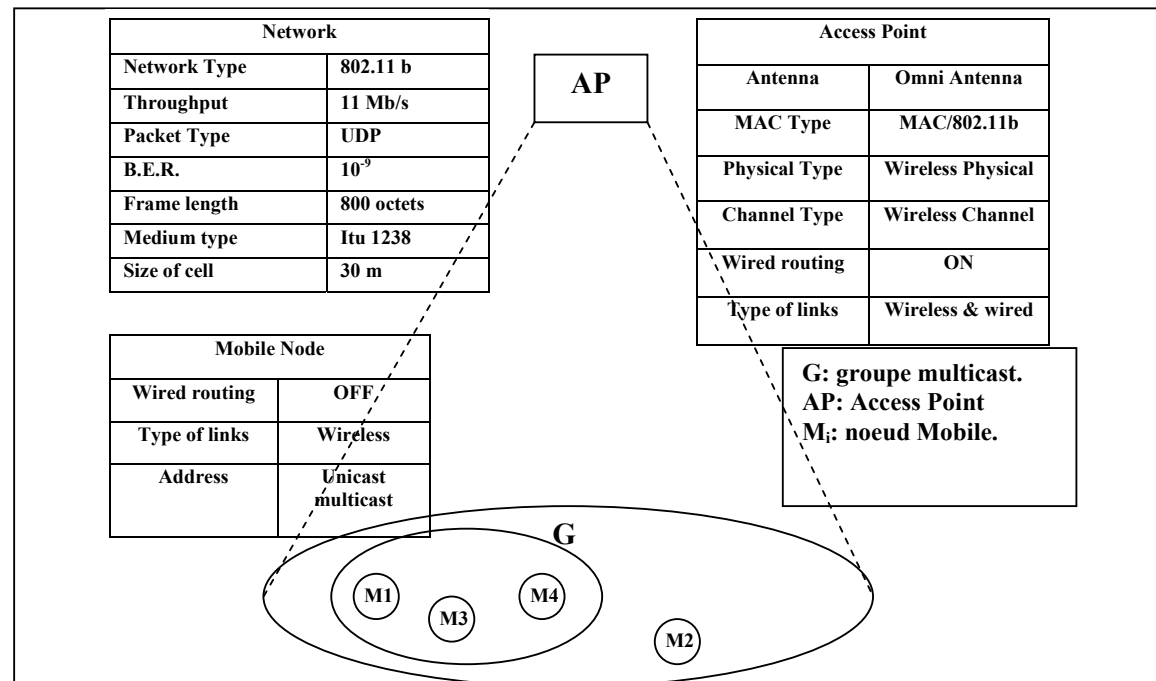


Figure IV. 9: Modèle de simulation.

Dans ce modèle de simulation, nous avons toujours (comme pour les modèles précédents) les deux types d'entités communicantes, mais ce qui diffère ici est l'utilisation de groupes multicasts. Chaque groupe possède une adresse multicast. Chaque nœud mobile appartenant au groupe multicast G possède deux adresses (au moins):

- son adresse unicast aussi appelée « adresse propre » pour les échanges unicast ;
- l'adresse du groupe multicast G auquel il appartient pour les échanges multicast concernant tous les nœuds du groupe  $M_i$  (il pourrait avoir d'autres adresses multicast si il appartenait à plusieurs groupes).

#### 4.3.3.3- Modélisation de la méthode multiple unicast

Pour réaliser la simulation de la méthode multiple unicast nous avons besoin de créer un nouvel agent et de l'implémenter dans le point d'accès. Le rôle de cet agent « waves » est :

- 1- de créer et de mettre à jour la table d'affiliation pour qu'elle prenne en compte le fait qu'un mobile puisse appartenir à un ou des groupes multicast ;
- 2- de faire débiter le cycle par le point d'accès en envoyant une trame d'interrogation au premier mobile de sa table d'affiliation (Figure IV.11-1) ;
- 3- à la réception de la trame multicast de la part de la station mobile source, le point d'accès la transmet directement vers tous les membres du groupe multicast l'un après l'autre par la technique « multiple unicast » (figure IV.11-2,3), sauf le mobile suivant (mobile de rang  $(i+1)$ ) de sa table d'affiliation, auquel il envoie une interrogation (qui inclut les informations du mobile source) (Figure IV.11-4) ;
- 4- Dans le cas où tous les membres du groupe ont échangé leurs informations, il interroge de nouveau le mobile de rang  $(i+1)$  de sa table d'affiliation.

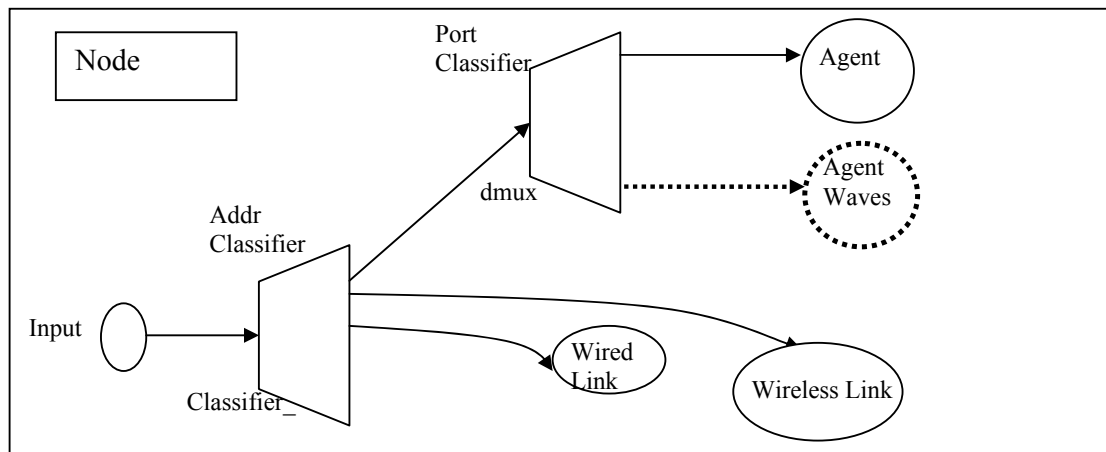


Figure IV. 10: Schéma de la station de base dans la méthode multiple unicast.

#### 4.3.3.3.1- Cas d'un seul groupe multicast sous une même cellule 802.11

Dans ce cas nous considérons un ensemble de mobiles qui bougent sous une même cellule 802.11 et qui appartiennent à un seul groupe multicast. Ces mobiles échangent leurs informations en utilisant la méthode multiple unicast. A chaque simulation nous varions le nombre des mobiles pour mesurer le temps de cycle.

##### a- Scénario de la simulation

Le point d'accès débute le cycle en interrogeant le premier mobile de sa table d'affiliation (Figure IV.11-1). À la réception de l'interrogation, ce mobile envoie une trame qui contient ses informations (destinée à tous les mobiles du groupe auquel il appartient) qui sera reçue par le point d'accès (Figure IV.11-2) puis, quand l'agent « waves » qui se trouve dans l'AP traite la trame reçue, il l'envoie vers tous les autres mobiles du groupe par la technique multiple unicast sauf au mobile suivant (mobile de rang  $(i+1)$ ) de sa table d'affiliation à qui il envoie les informations à diffuser avec une invitation à envoyer les siennes (Figure IV.11-3 ,4).

Le cycle se termine quand le point d'accès interroge de nouveau le premier mobile de sa table d'affiliation.

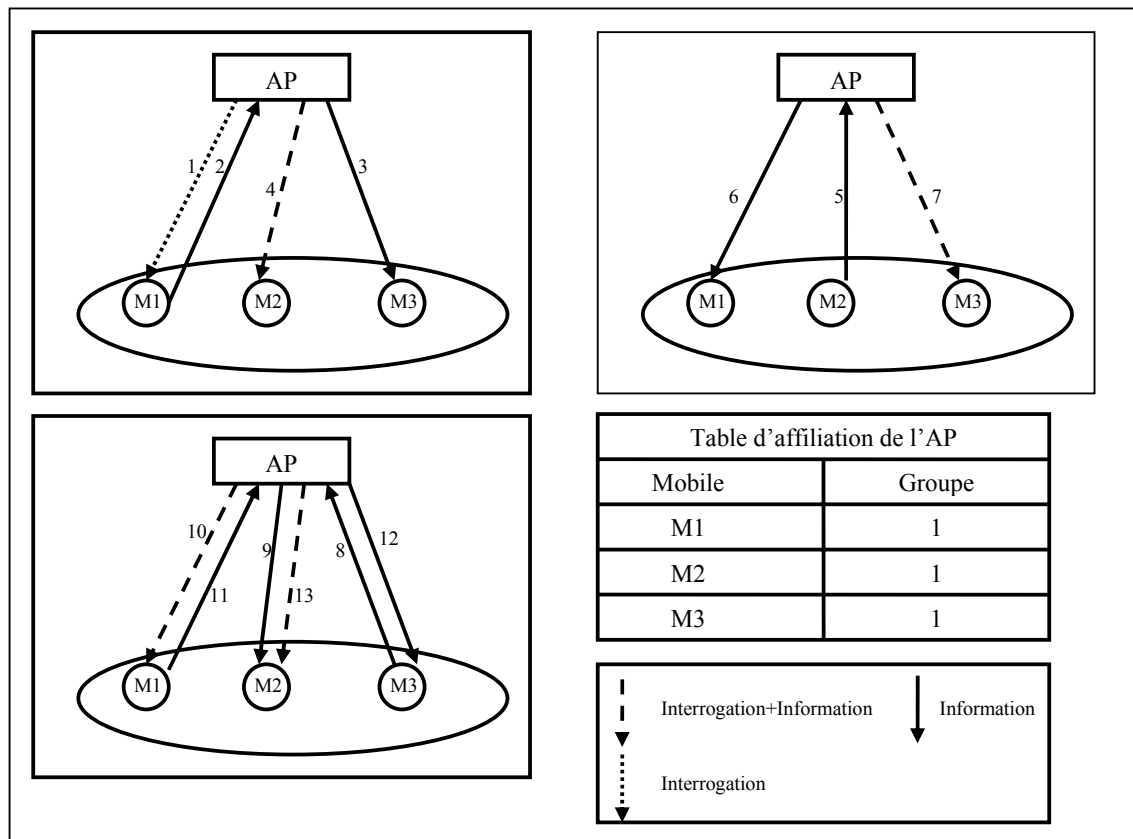
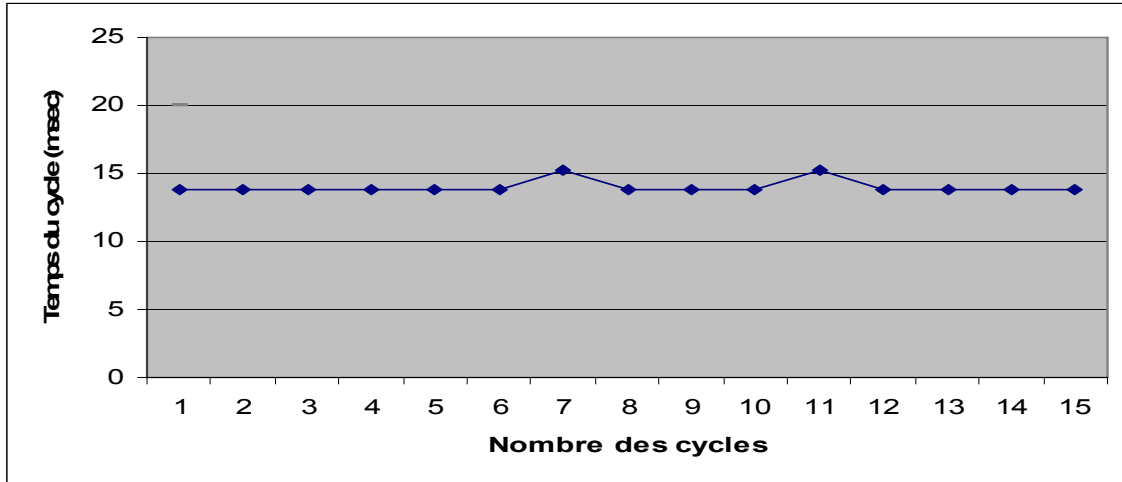


Figure IV. 11: Scénario de la simulation de la méthode « multiple unicast » (cas d'un seul groupe).

#### b- Résultats obtenus par la méthode multiple unicast

Dans un premier temps nous avons considéré un groupe multicast contenant 3 mobiles. Les résultats de simulations sont donnés par la figure suivante.

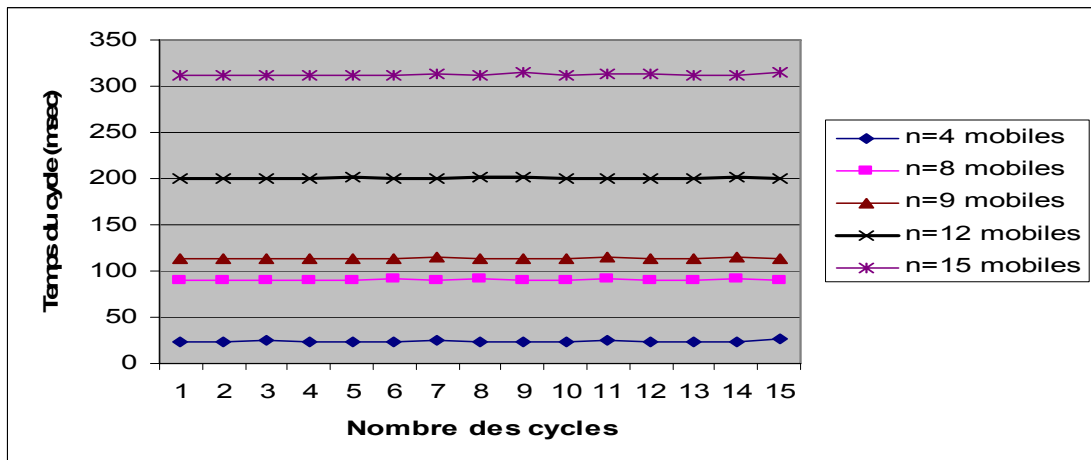


**Figure IV. 12: Résultats de simulation de la méthode multiple unicast pour un groupe de 3 mobiles.**

La figure IV.12 présente le temps de cycle (en utilisant la méthode multiple unicast) d'un groupe multicast contenant 3 mobiles. L'analyse des résultats de simulation montre que le temps moyen de cycle en utilisant la méthode multiple unicast est égal en moyenne à 13.8 ms avec un écart type de 0.49.

Essayons, maintenant, de trouver une relation entre le nombre de mobiles communicants et le temps moyen d'un cycle. Pour ceci, il suffit de refaire la même simulation que pour le paragraphe précédent mais avec différents nombres de mobiles dans le groupe multicast G.

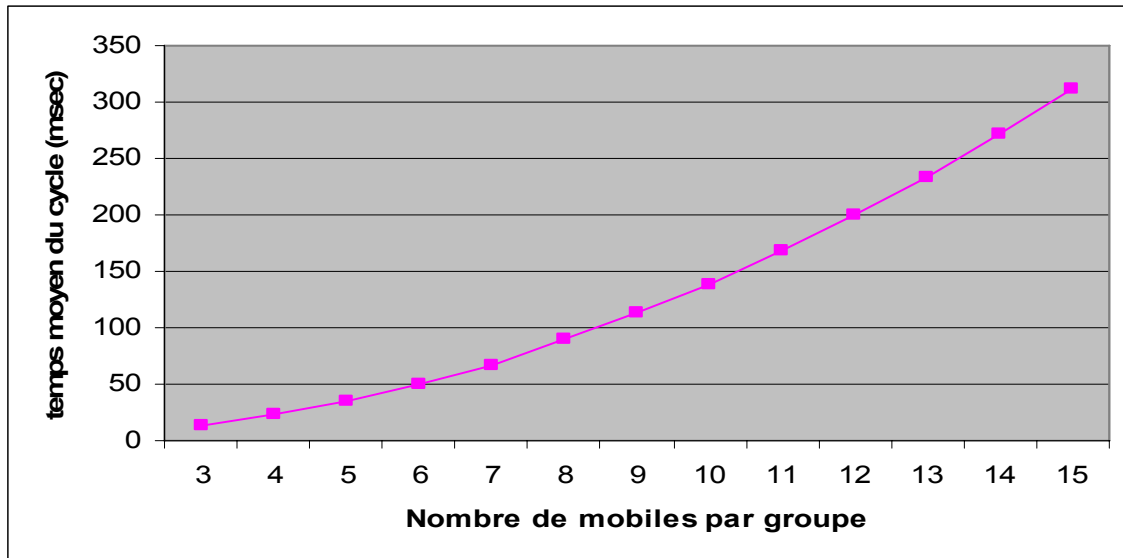
La figure IV.13 représente les temps de transmission pour un groupe G composé de 4, 8, 9, 12 et 15 mobiles.



**Figure IV. 13: Résultats de simulation de la méthode multiple unicast.**

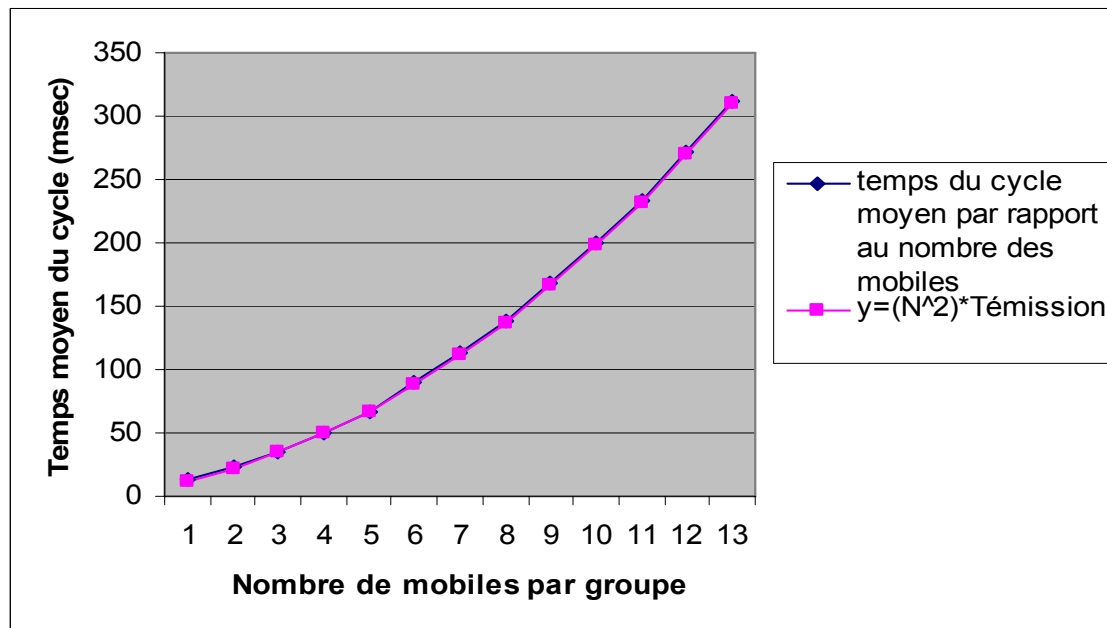


Etudions maintenant, le temps moyen d'un cycle en fonction du nombre de mobiles du même groupe, à l'aide de la courbe donnée en IV.14.



**Figure IV. 14: Temps de cycle moyen par rapport au nombre des mobiles.**

L'allure de cette courbe (Figure IV.14), obtenue à partir de résultats de simulation nous a incité à la modéliser par une fonction du type  $y = ax^2 + bx + c$  (y étant le temps de cycle moyen et x le nombre de mobiles inclus dans le groupe multicast)



**Figure IV. 15: Comparaison entre le temps moyen d'un cycle avec  $y = N^2 * T_{\text{émission}}$ .**

En fait une approximation par  $y = ax^2$  convient comme le montre la figure IV.15.

Ce qui nous permet d'introduire la relation :

$$T_{\text{cycle}} = N^2 * T_{\text{émission}} \quad (4.1)$$

Avec :

$T_{\text{cycle}}$  : Temps moyen d'un cycle ;

$N$  : Nombre de mobiles appartenant au groupe multicast ;

$T_{\text{émission}}$  : Temps d'une seule émission entre le point d'accès et un mobile ou vice versa.

En se référant à la figure IV.14 et si nous souhaitons un temps de cycle des échanges inférieur ou égal à 100 ms alors le nombre de mobiles d'un même groupe coopératif sous une même cellule doit être inférieur ou égal à 8 mobiles.

Le tableau suivant montre les incidences du modèle de propagation, il indique le nombre de trames qu'il a fallu répéter en raison des imperfections du médium en utilisant la méthode « multiple unicast » pour un groupe constitué de 3, 4, 6 et 8 mobiles.

Nb. de mobiles/groupe	Nb. de cycles	Nb. de trames émises	Nb de trames répétées
3	15	150	5
4	15	255	18
6	15	555	25
8	15	975	43

**Tableau IV.3 : Impact des imperfections du médium.**

#### **4.3.3.3.2- Cas de plusieurs groupes de coopération sous une même cellule**

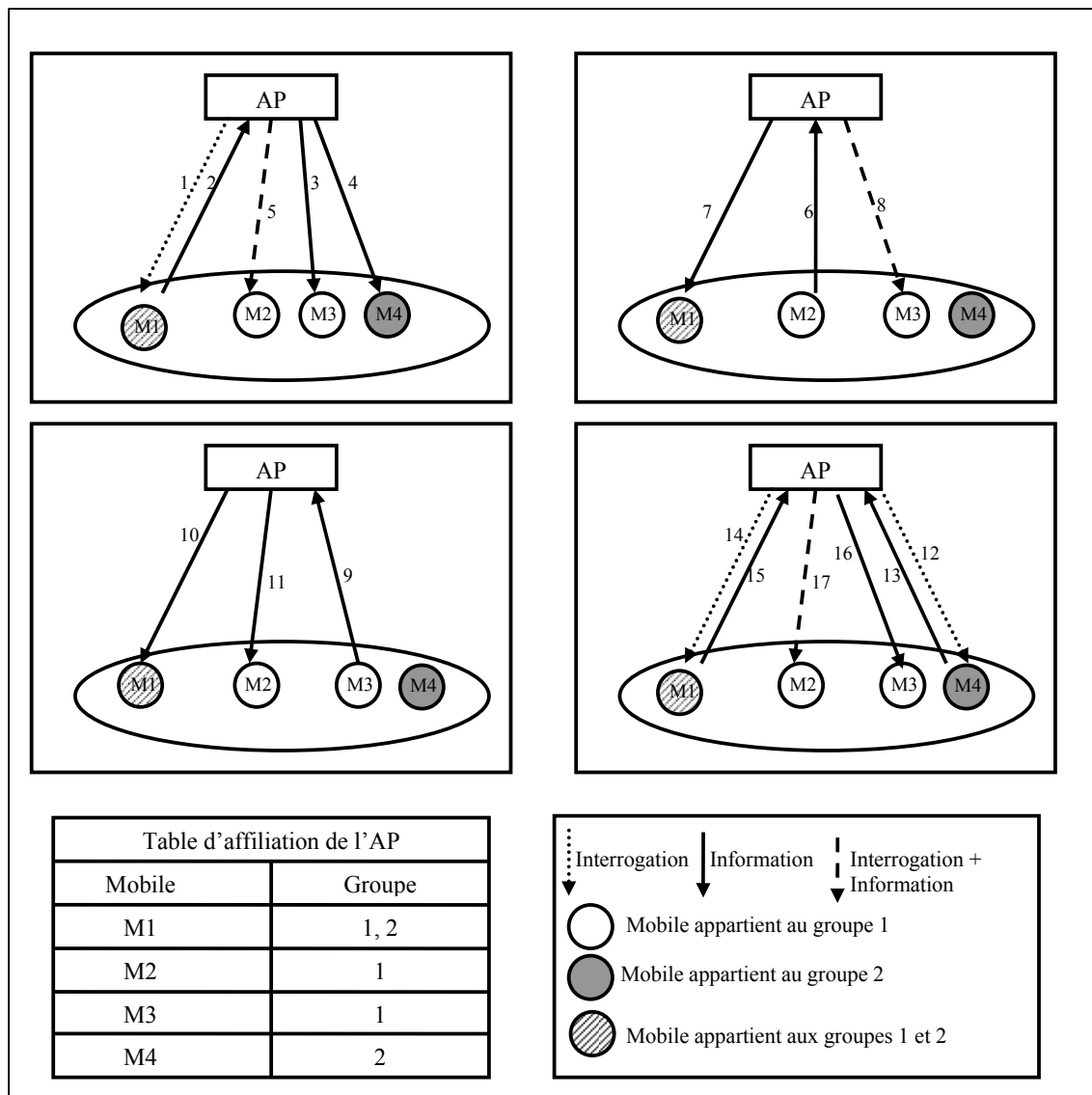
Dans ce cas nous considérons que les mobiles affiliés à un point d'accès appartiennent à plusieurs groupes multicast. Chaque mobile coopère alors avec les autres mobiles du ou des groupes auquel il appartient. Dans ces simulations nous avons saisi la même démarche que précédemment.

##### **a- Scénario de la simulation**

Le point d'accès débute le cycle en interrogeant le premier mobile de sa table d'affiliation (Figure IV.16-1). À la réception de l'interrogation, ce mobile envoie au point d'accès, les informations destinées à tous les mobiles du/des groupes auxquels il appartient (Figure IV.16-2). C'est l'agent « waves » qui se trouve dans l'AP qui traite la trame reçue, il l'envoie vers

tous les autres mobiles du/des groupes par la technique multiple unicast (Figure IV.16-3, 4) sauf au mobile suivant de sa table d'affiliation auquel il envoie une invitation à envoyer ses informations (qui contient les informations du mobile source) (Figure IV.16-5). Dans le cas où tous les membres du groupe ont échangé leurs informations, le point d'accès interroge de nouveau le mobile suivant de sa table d'affiliation (Figure IV.16-12). Dans le cas où le point d'accès interroge un mobile qui n'appartient à aucun groupe, le mobile interrogé répond par une trame vide au point d'accès (i.e qui ne contient aucune information à diffuser).

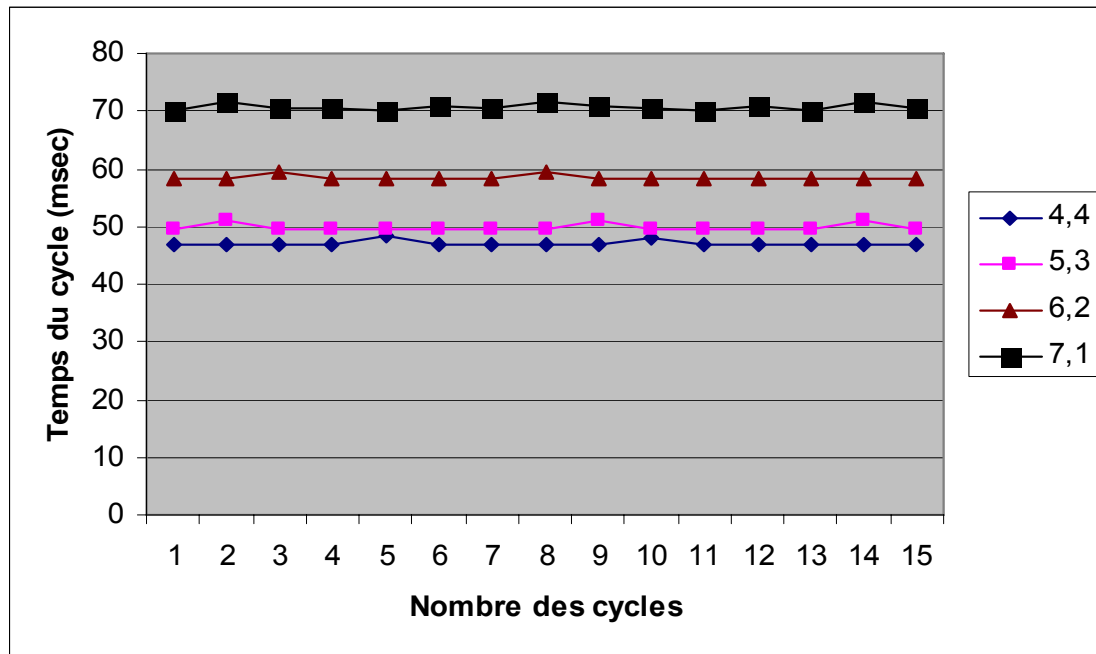
Cette procédure sera répétée jusqu'au le dernier mobile de la table d'affiliation pour continuer par le premier et ainsi de suite.



**Figure IV. 16: Scénario de la simulation de la méthode « multiple unicast » (cas de plusieurs groupes).**

### b-Résultats obtenus

Le graphe IV.17 représente les temps moyens de cycle de transmission obtenus quand huit mobiles sont repartis en deux groupes selon les combinaisons 4-4, 5-3, 6-2 et 7-1.



**Figure IV. 17: Temps de cycle moyen en fonction de la composition des groupes multicast.**

Le tableau suivant (IV.4) montre le temps moyen de cycle par rapport à la distribution des mobiles dans les deux groupes.

Nb des mobiles (1 <sup>er</sup> groupe)	Nb des mobiles (2 <sup>ème</sup> groupe)	Temps moyen d'un cycle (msec)
1	7	70.6
2	6	58.4
3	5	49.9
4	4	46.8

**Tableau IV.4 : Temps moyen de cycle par rapport à la distribution des mobiles dans les deux groupes.**

#### **4.3.3.3-Discussion sur les résultats de la méthode multiple unicast**

Les travaux faits par « Patrick Lafarguette » sur les méthodes broadcast-broadcast, broadcast-unicast, unicast-broadcast [Laf03] ont donné un temps moyen de cycle élevé par rapport aux résultats obtenus par multiple unicast. Nous pouvons dire que pour un nombre de mobiles inférieur ou égal à huit, notre méthode est plus efficace (que les méthodes de broadcast) et cela est dû au fait que cette méthode évite l'utilisation des « beacons », car ici, nous n'avons pas utilisé le vrai multicast qui oblige, lui, à attendre le départ des « beacons ». Nous avons simulé une technique similaire au multicast classique qui a la particularité de ne pas nécessiter l'attente d'un « beacon » à chaque diffusion de la trame par le point d'accès, à tous les membres du groupe multicast.

#### **4.3.3.4- Modélisation de la méthode Pseudo-PCF**

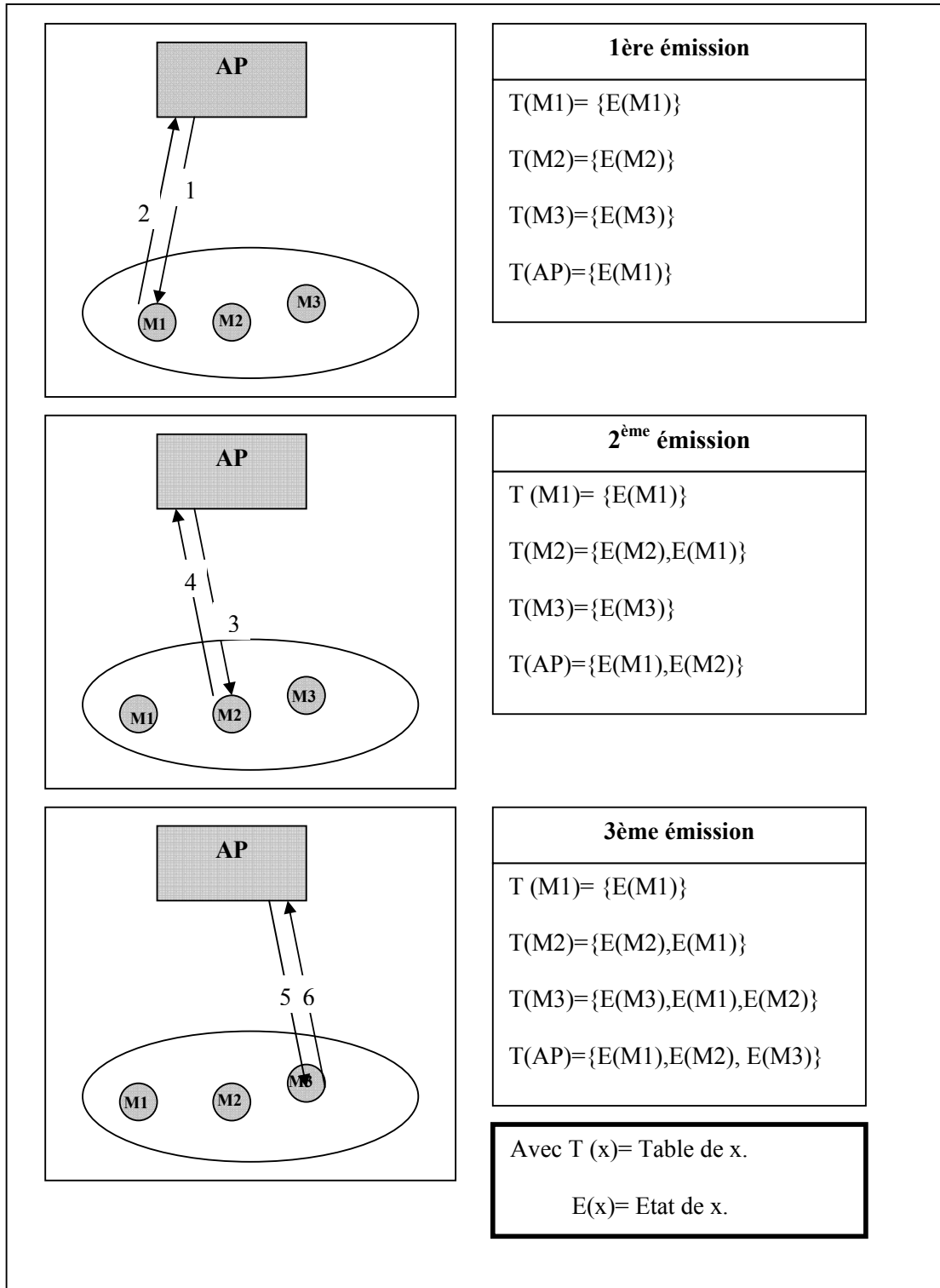
Pour cette méthode, nous avons utilisé le même modèle que celui retenu pour la partie précédente mais en modifiant l'agent « waves ». Les mobiles du groupe multicast  $G$  sont classés dans une liste  $(M_1, M_2, \dots, M_N)$ . Cycliquement l'AP commence à interroger le premier de cette liste. Lorsque l'agent de l'AP reçoit le paquet du mobile  $(M_n)$ , il met à jour la table des informations  $(T(AP))$  relative à la coopération correspondant au groupe  $G$ , puis il transmet directement les informations utiles au mobile suivant  $(M_{n+1})$  de sa table d'affiliation. De même, quand le mobile reçoit la trame, il répond par ses informations désignées par  $E(x)$  quand il s'agit du mobile  $x$ , à diffuser à son ou ses groupes de coopérations.

#### **a- Scénario de la simulation**

Un groupe multicast est constitué d'un ensemble de mobiles que le point d'accès gère à partir d'une liste ordonnée  $(M_1, M_2, \dots, M_N)$  et d'une structure de données contenant les informations partagées [jac04]. Le cycle commence quand l'AP interroge le premier mobile du groupe pour modifier sa table d'information, à la réception d'une requête (de l'AP), le mobile envoie vers le point d'accès ses propres informations qui à son tour interroge le nœud suivant sur sa liste en lui envoyant sa table d'information et ainsi de suite jusqu'au dernier mobile du groupe  $G$  (figure IV.18).

Dans cette simulation deux types de trafic existent :

- TTR : c'est un trafic temps réel, toujours présent dans l'échange ;
- TA : lorsqu'il y a un trafic additionnel, il est associé au trafic temps réel.



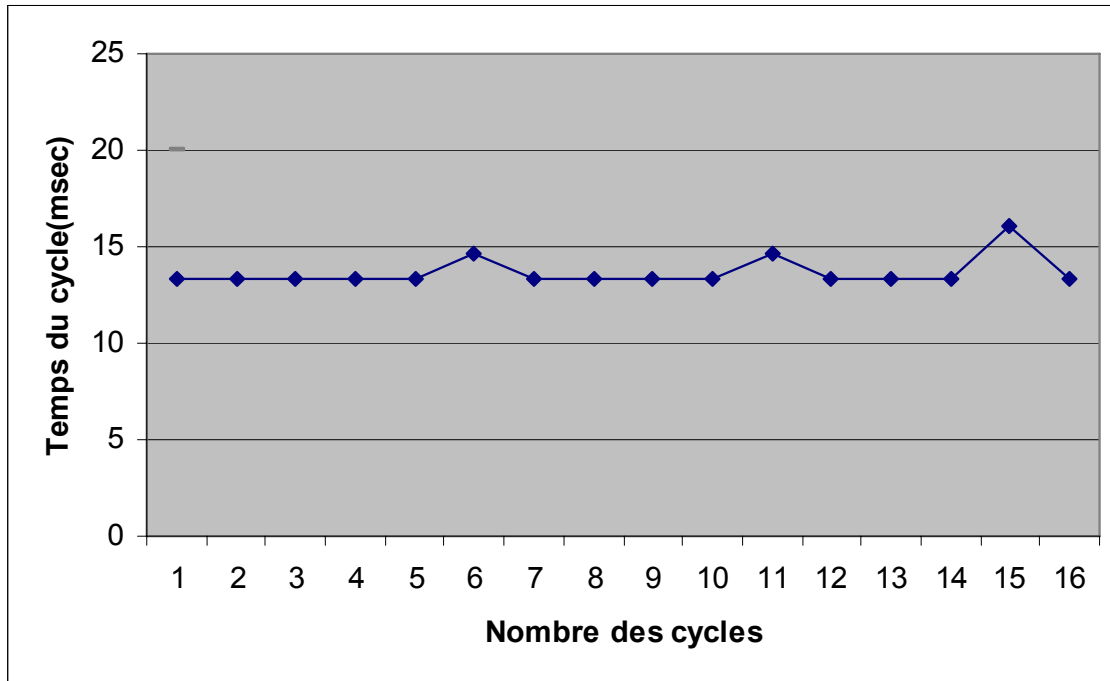
**Figure IV. 18: Scénario de la simulation dans la méthode Pseudo-PCF.**

Cette figure montre tous les échanges nécessaires pour faire un cycle complet en utilisant la méthode Pseudo-PCF. Dans le premier cas (1<sup>ère</sup> sous figure), l'AP interroge le premier mobile du groupe G, qui à son tour répond par son état  $E(M1)$ . À la réception de l'état, le point

d'accès modifie sa table d'information T(AP), puis elle interroge le deuxième mobile en envoyant l'état du M1 (2<sup>ème</sup> sous figure). Maintenant, le deuxième mobile modifie sa table d'information T(M2) et répond à l'AP par son état. Cette procédure sera répétée pour tous les mobiles de la table d'affiliation de l'AP.

#### **b- Résultats obtenus par la méthode Pseudo-PCF**

Nous avons considéré, dans un premier temps, un groupe multicast contenant 4 mobiles. Les résultats de simulations sont donnés par la figure suivante.



**Figure IV. 19: Résultat de simulation de la méthode Pseudo-PCF pour un groupe de 4 mobiles.**

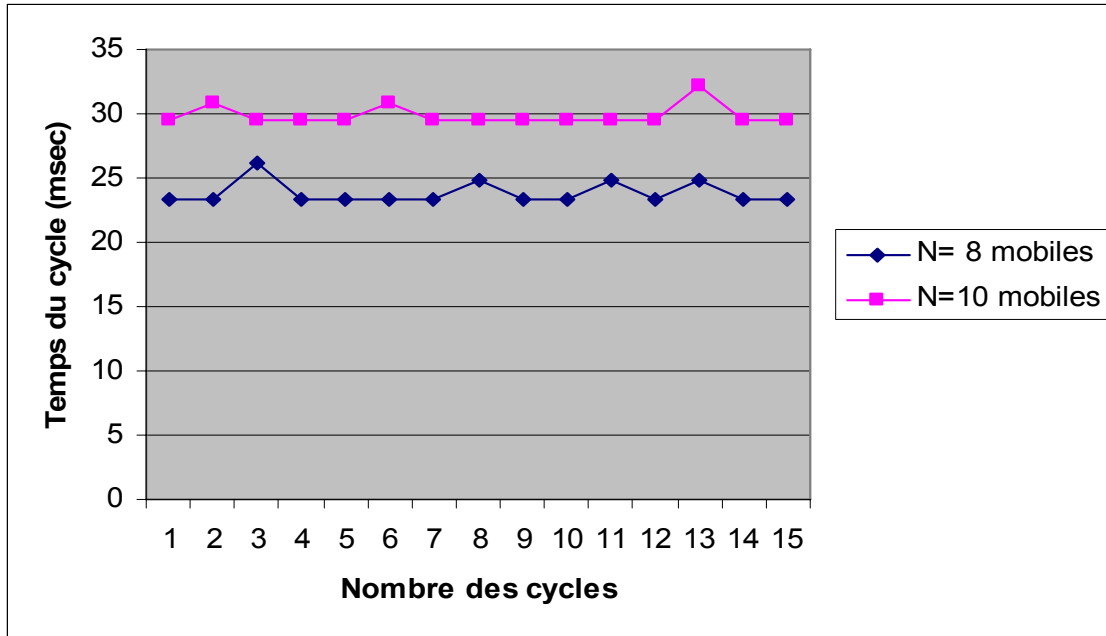
La figure IV.19 présente le temps de cycle (en utilisant la méthode Pseudo-PCF) d'un groupe contenant 4 mobiles.

#### **Relation entre nombre de mobiles et temps moyen d'un cycle**

Essayons de trouver une relation entre le nombre de mobiles communicants et le temps moyen d'un cycle. Pour ceci, il suffit de refaire la même simulation que pour le paragraphe précédent mais avec différents nombres de mobiles dans le groupe.

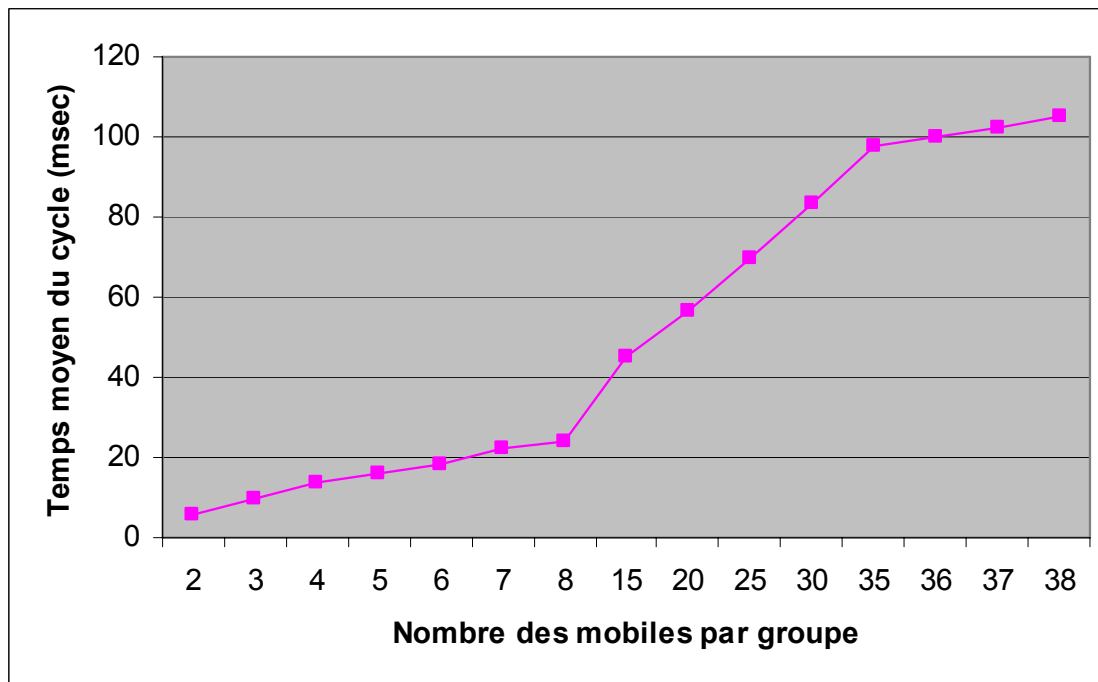
La simulation nous permet de dépasser la limite imposée par le nombre de mobiles que nous avons et d'avoir des résultats pour des valeurs de N significatives au delà de 4.

La figure IV.20 représente les temps moyen des cycles pour un groupe G composé de 8, 10 mobiles.



**Figure IV. 20: Résultats de simulation (n=8, 10 mobiles).**

Etudions maintenant, le temps moyen d'un cycle en fonction du nombre de mobiles du même groupe, à l'aide de la courbe donnée en IV.21.



**Figure IV. 21: Temps de cycle moyen par rapport au nombre des mobiles.**

La figure IV.21 montre que si nous souhaitons un temps de cycle des échanges inférieur ou égal à 100 ms alors le nombre de mobiles d'un même groupe coopératif sous une même cellule doit être inférieur ou égal à 36 mobiles.



Le tableau suivant est une comparaison entre les moyennes de temps de cycle pour les deux méthodes multiple unicast et Pseudo-PCF quand le nombre de mobiles appartenant au groupe multicast évolue de 3 à 8.

Nombre des mobiles/groupe	T (multiple unicast) en ms	T (Pseudo-PCF) en ms
N=3	13.8	9.1
N=4	24.1	13.5
N=8	89.6	23.7

**Tableau IV.5 : Comparaison entre multiple unicast et Pseudo-PCF**

#### **4.3.3.5- Évaluation du multicast**

Dans les paragraphes précédents nous avons présenté deux façons de réaliser le multicast à l'intérieur d'une cellule : l'une, consistant à utiliser simplement le multiple unicast et l'autre, qui hérite de l'option PCF. Pour notre domaine industriel les résultats obtenus par multiple unicast ont montré l'inefficacité de cette méthode quand le nombre des mobiles augmente dans un groupe multicast. Pour évaluer la borne A de l'équation (3.2) nous allons utiliser la méthode unicast-unicast décrit dans le chapitre 3 (partie 3.1.2.5). Cette méthode a donné un temps de cycle efficace pour notre domaine (annexe C) car ce temps est plus petit que le temps donné par multiple unicast et surtout il augmente relativement doucement quand le nombre des mobiles dans un groupe augmente.

Les résultats obtenus par la méthode Pseudo-PCF nous permettent d'évaluer la borne B de l'équation (3.2)

#### **4.3.3.6-Conclusion de la partie sur les échanges**

En l'absence d'une version disponible de l'option PCF du standard 802.11, il est intéressant de s'inspirer de ses mécanismes pour faire jouer un rôle de maître aux points d'accès d'un WLAN avec infrastructure quand il s'agit de considérer un trafic contraint par le temps. Nous avons montré l'intérêt d'intégrer au sein des points d'accès une fonction Miroir qui stocke les informations à partager entre les membres des groupes de coopérations. Compte tenu de la taille relativement réduite d'une cellule et de la nature des applications industrielles envisageables, le nombre de mobiles coopérants que nous avons considéré dans cette étude est restreint à quelques unités, le cas d'une cellule occupée par 15 mobiles est le cas représentatif que nous avons retenu pour vérifier que notre solution satisfait bien aux objectifs initiaux que nous avons évoqués.

Les résultats ont montré que pour faire un temps de cycle rapide il est intéressant d'utiliser la table d'information dans le point d'accès associée à la méthode pseudo-PCF.

#### 4.3.3.7- Perspectives

La méthode Pseudo-PCF qui vient d'être présentée ne prend en compte ni le trafic additionnel venant du serveur d'application ni les effets de la concurrence pour accéder au médium si la période  $T$  devient plus petite que  $T_{\text{multicast}}$  ni les effets de collision entre cellule.

Le temps nécessaire pour effectuer un cycle complet pour une basse activité du trafic IP (quelques trames par seconde) est indiqué par les résultats de simulation de la figure IV.21. Comme dans le cas du multiple unicast, pour cette stratégie, nous faisons l'hypothèse probable que le mode d'économie d'énergie n'est pas employé par des mobiles pendant leur coopération. Les mesures qui ont été données dans [Her03][Jac04] et les résultats de simulation que nous venons de présenter démontrent qu'il est possible d'exécuter un multicast rapide dans une cellule d'un réseau 802.11.

#### 4.3.4- Modélisation des méthodes de Back-off

Nous allons maintenant décrire les modélisations effectuées afin d'ajuster par simulation les paramètres  $a$  et  $b$  de l'algorithme de Back-off modifié dans une cellule de WAVES pour obtenir un comportement adapté à nos contraintes temporelles.

##### 4.3.4.1- Modèle de simulation

Nous utilisons toujours le même modèle de simulation que celui utilisé dans la première partie (voir 4.3.1.1) mais avec un nombre variable de mobiles.

Le but de cette simulation est d'étudier l'effet de la charge (en modifiant le nombre de mobiles) sur le temps de transmission pour différentes valeurs des paramètres :  $a$  et  $b$  de l'algorithme du Back-off déjà décrit dans le chapitre 3 (partie 3.4).

Notre démarche s'appuie sur des coopérations impliquant les mobiles dans la cellule, par paires, une paire de mobiles a été choisie comme référence.

Notre protocole de simulation est le suivant :

Nous allons évaluer les changements de conditions de trafic entre ces deux mobiles quand la charge de la cellule augmente. Pour augmenter la charge de la cellule, nous avons choisi d'augmenter le nombre des mobiles en introduisant de nouvelles paires (les mobiles communiquant entre eux par paire), chacune formant un groupe de coopération. Dans l'exemple de la figure IV.22 il s'agit de la paire  $M_5 - M_6$ . Pour chaque simulation nous avons fait varier les valeurs de  $a$  et de  $b$ .

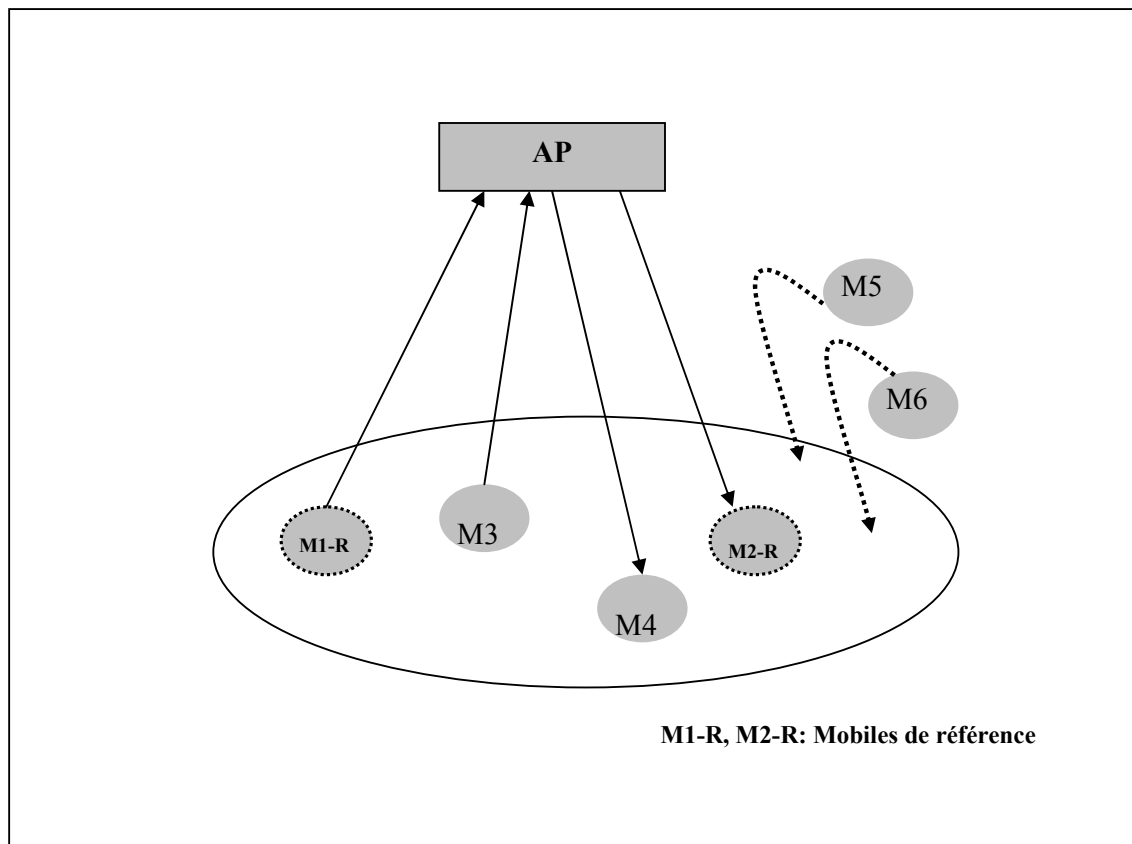
Tous ces mobiles émettent, via l'AP, entre eux (par paire) à une fréquence suivant une loi normale de moyenne 50 ms et de variance 10.

Si  $D$  est le délai de transmission entre les mobiles de référence, il peut être défini comme le temps séparant l'envoi du message ( $T_{\text{emis}}$ ) et le temps correspondant à la réception de ce message par le mobile récepteur  $T_{\text{rec}}$ , c'est à dire :

$$D = \text{Max}(T_{\text{rec}} - T_{\text{emis}}) \quad (4.2)$$

Il est à noter que cette simulation va nous aider à trouver les valeurs optimales de  $a$  et de  $b$  de l'algorithme de Back-off modifié.

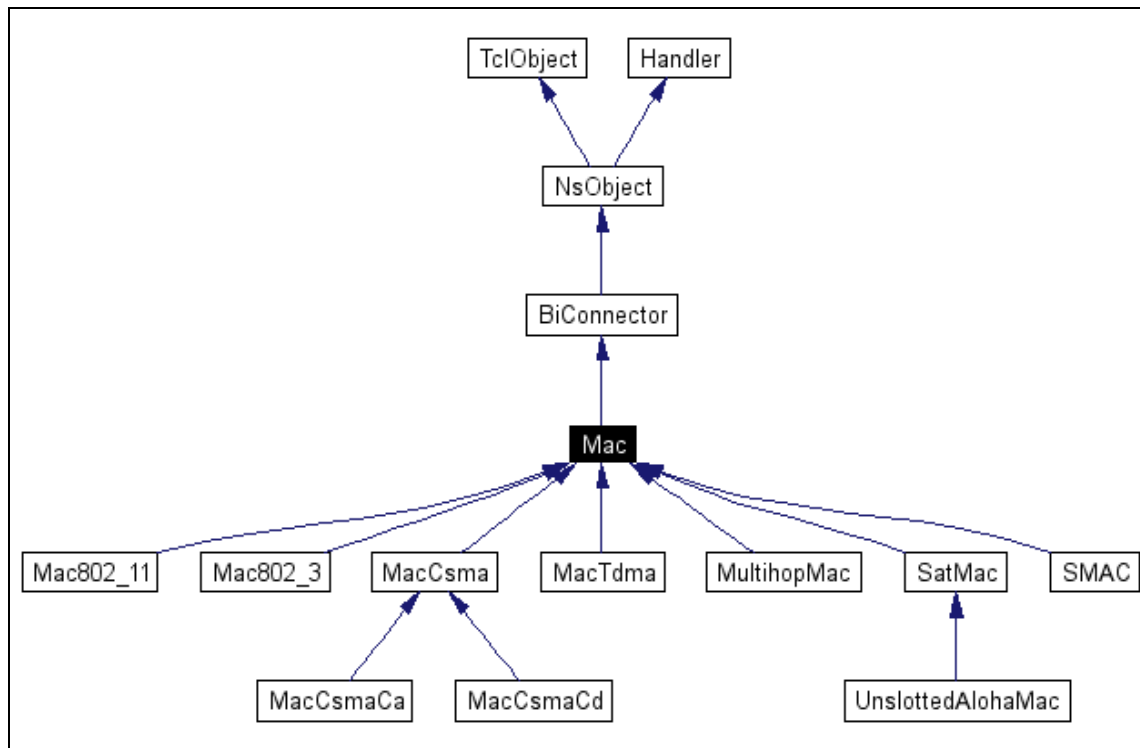
La figure suivante décrit notre travail :



**Figure IV. 22: Principe de simulation utilisé pour évaluer le Back-off modifié.**

#### 4.3.4.2- Implémentation de l'algorithme de Back-off

Nous allons profiter du fait que l'algorithme de Back-off standard BEB soit implémenté dans NS2. Pour implémenter notre algorithme de Back-off dit « modifié », il suffit d'agir sur quelques fichiers de la hiérarchie de NS2 au niveau MAC. La figure suivante (IV.23) nous montre cette hiérarchie.



**Figure IV.23: Hiérarchie de NS2 au niveau MAC [Ns06].**

Après l'étude de cette hiérarchie, nous avons décidé de modifier le code C++ des fonctions incluses dans CSMA/CA.cc et Mac802\_11.cc.

Ces modifications sont liées à l'étude décrite dans le chapitre 3 (partie 3.4). Nous voulons modifier la formule de Back-off de la façon suivante :

En cas d'échec de transmission:

- $CW = \min(a.CW, CW_{\max})$

Et à chaque succès de transmission, nous décrétons la valeur de CW par une valeur b.

- $CW = \max(CW - b, CW_{\min})$

Pour faire ces modifications nous avons recours au code C++ de NS2 et nous avons modifié le fichier Mac/Mac-Csma.cc de la façon suivante :

- En cas d'échec de transmission, nous avons travaillé sur la méthode `MacCdma::backoff(...)`. Nous avons modifié cette méthode en mettant  $CW = \min(a.CW, CW_{\max})$ , a étant initialisé avec une valeur prise dans l'intervalle [1,2].
- En cas de succès de transmission, nous avons travaillé sur la méthode `MacCdma::endofContention`. Nous avons modifié cette méthode en mettant  $CW = \max(CW_{\min}, CW - b)$  à la place de  $CW = CW_{\min}$ .

#### 4.3.4.3- Scénario de la simulation

Nous calculons la moyenne du temps de transmission entre deux mobiles de référence pendant un intervalle de temps  $T = 1s$  pendant lequel la charge de la cellule reste constante. Puis toutes les secondes nous augmentons la charge de la cellule (nombre des mobiles) en faisant entrer une nouvelle paire coopérantes.

Nous supposons que tous ces mobiles transmettent suivant une loi normale  $N(50 \text{ msec}, 10)$ .

Afin de trouver les meilleures valeurs de  $a$  et de  $b$ , nous faisons varier  $a$  dans l'intervalle  $[1,2]$  et pour chacun de  $a$ , la valeur de  $b$  varie dans l'intervalle  $[0,2]$ .

Les résultats obtenus à la fin des simulations correspondant aux différentes valeurs de  $a$  et de  $b$  vont nous permettre de choisir leurs valeurs optimales. L'optimum signifie ici conduisant à un délai de transmission minimal.

L'organigramme suivant (Figure IV.24) décrit le scénario de la simulation et l'incrémentation de  $a$  et de  $b$ .

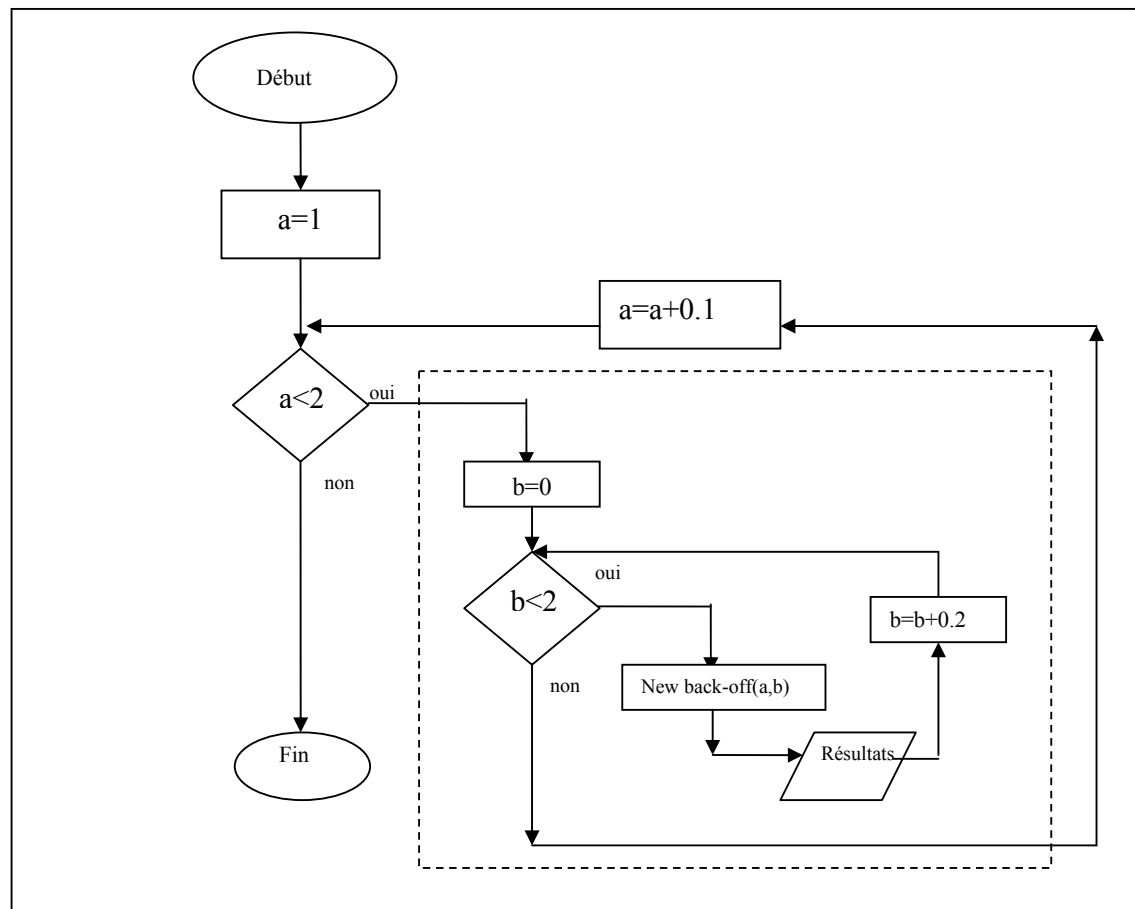


Figure IV.24: Algorithme d'évaluation des valeurs de  $(a, b)$  du Back-off modifié.

#### 4.3.4.4- Amélioration du Back-off

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus par la modification du mécanisme de Back-off. Pour cela, nous présentons premièrement les résultats dans le cas général en le comparant au BEB classique. Dans un deuxième temps, nous présentons les résultats par rapport à notre cas industriel où le délai maximal accepté est de 100 ms.

##### a- Cas général

Notre but est de faire plusieurs simulations en changeant les valeurs de  $a$  et de  $b$  du mécanisme du Back-off modifié qui est décrit dans le chapitre 3 (partie 3.4). À chaque simulation, nous mesurons le temps de transmission entre ces deux mobiles choisis comme paire de référence, en ajoutant à chaque fois une charge supplémentaire au réseau (en ajoutant d'autres paires de mobiles).

Notre objectif est de choisir les valeurs optimales de  $a$  et de  $b$ , qui donne :

- le temps de transmission minimal ;
- une capacité maximale.

Pour cela, nous avons fait 6 x 11 simulations correspondant aux valeurs de  $a$  et de  $b$ . Nous présentons dans la figure IV.25 le graphe grâce auquel nous avons trouvé les valeurs les plus optimales de  $a$  et de  $b$ . Les autres graphes sont reportés en annexe A.

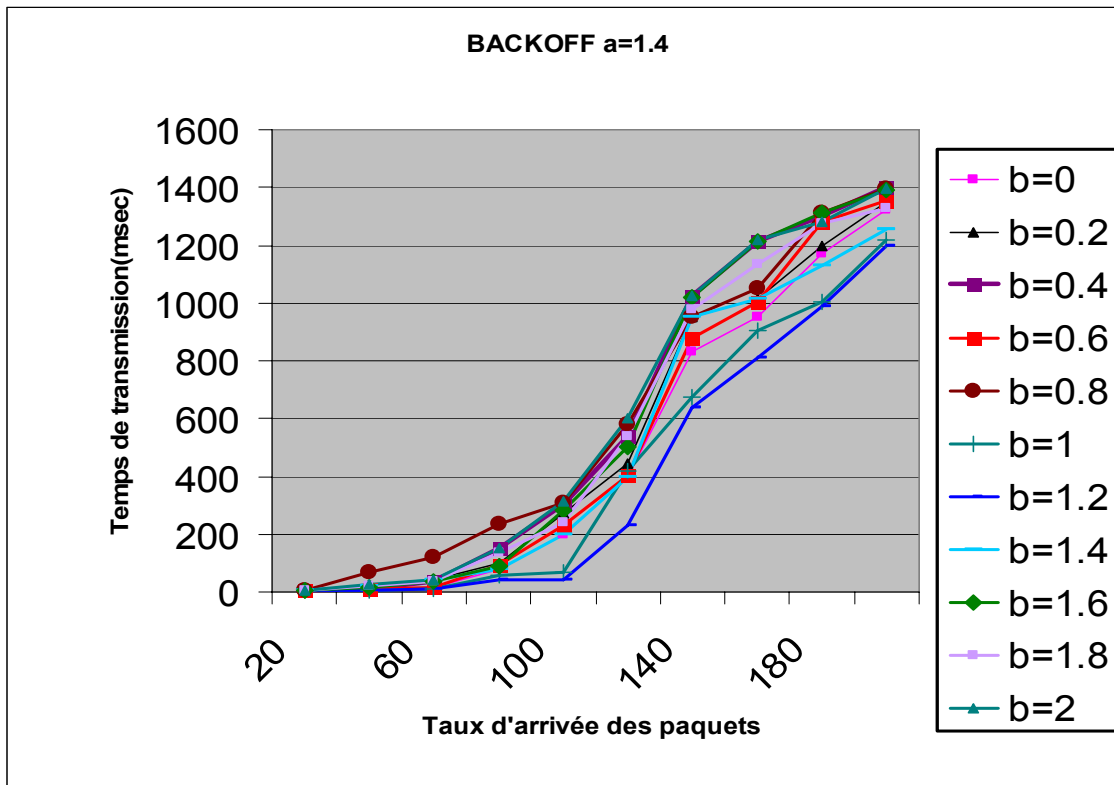


Figure IV. 25: Résultats de Back-off obtenus pour  $a=1.4$ .

La figure IV.25 représente le temps de transmission entre deux mobiles par rapport au trafic dans la cellule pour  $a = 1,4$ .

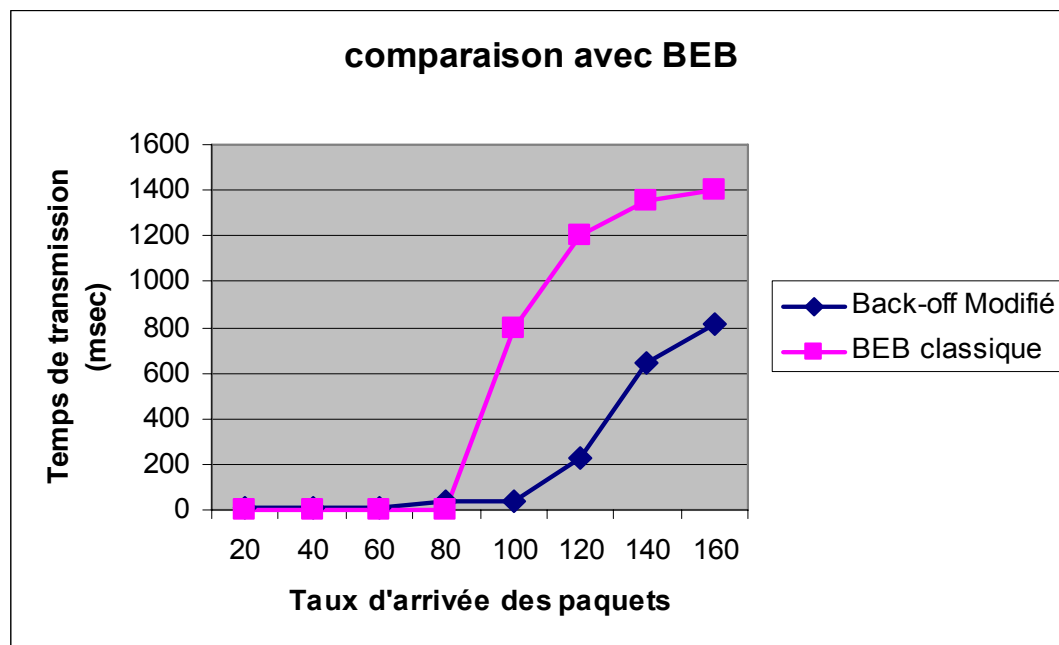
Le débit représente le nombre des paquets produits par seconde dans une cellule.

Ce graphe montre que le temps de transmission est proportionnel :

- à la charge du réseau (taux d'arrivée des paquets) ;
- aux valeurs de  $a$  et de  $b$  de l'algorithme de Back-off.

En se basant sur les graphes obtenus et puisque la courbe de  $a = 1,4$  et  $b = 1,2$  a donné le temps de transmission minimale et la capacité maximale, nous pouvons dire maintenant que ces valeurs sont les valeurs à retenir pour notre domaine de travail.

Les valeurs représentées dans la figure IV.26 représentent les résultats donnés par le BEB classique [Nak05] et par le Back-off modifié avec les valeurs de  $a$  et de  $b$  que nous venons de retenir.



**Figure IV.26: Comparaison entre BEB et Back-off modifié.**

En comparant les résultats obtenus (pour  $a = 1,4$  et  $b = 1,2$ ) avec les résultats obtenus par le BEB classique présentés dans la figure IV.26, nous pouvons dire que notre méthode est plus performante que BEB car elle a donné :

- un temps de transmission plus petit entre les mobiles de la paire de référence ;
- une capacité plus grande pour la charge d'une cellule.

### b- Application du BEB modifié au domaine industriel représenté par WAVES

Dans le cadre du projet WAVES, nous travaillons sur un petit nombre des mobiles qui bougent dans une cellule (maximum 15 mobiles). Les échanges dans un groupe de mobiles coopérants doivent être réalisés dans un délai qui ne dépasse pas les 100 ms.

C'est pourquoi, nous devons étudier les performances de notre Back-off modifié pour ces conditions ou contraintes particulières.

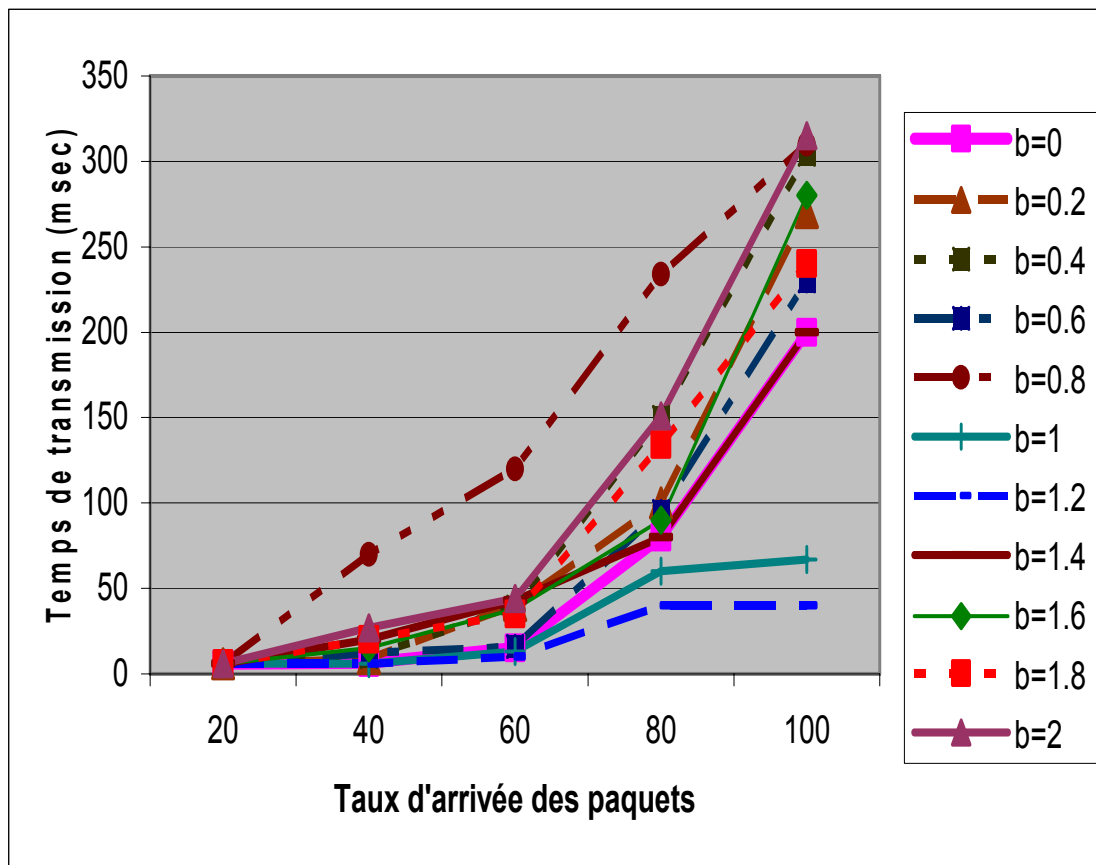


Figure IV. 27: Résultats de Back-off obtenus pour des petites charges (maximum 15 mobiles/cellules).

La figure IV.27 montre que les valeurs de  $a = 1.4$  et de  $b = 1.2$  sont aussi les plus intéressantes pour notre domaine de travail (pour des petites charges).

### Conclusion du chapitre 4

À cause de sa flexibilité, la disponibilité de son code et sa gratuité, nous avons choisi le simulateur NS2 pour notre travail.



Ce chapitre était consacré à la description des différentes simulations réalisées dans notre thèse, quatre types de simulations ont été abordés :

- celle permettant de prendre en compte un modèle de propagation spécifique ;
- celle permettant d'estimer la taille d'une cellule ;
- celles des méthodes d'échanges proposées ;
- et enfin la simulation du Back-off modifié.

Le but de ces simulations, dans WAVES, était de minimiser le temps de cycle entre les mobiles coopérant dans une cellule 802.11 industriel (WAVES). Les résultats obtenus premièrement par les méthodes d'échanges ont montré, que pour avoir un temps de cycle rapide il est intéressant d'implémenter la notion de table d'information dans le point d'accès.

Les résultats obtenus par la modélisation de Back-off modifié ont montré que pour le domaine applicatif WAVES, les valeurs  $a = 1.4$  et  $b = 1.2$  sont les valeurs à retenir, car en comparant les résultats obtenus avec ceux de BEB classique nous remarquons que notre approche est plus performante notamment pour un nombre de mobiles par cellule égal ou inférieur à 15 (charge qui correspond aux hypothèses de notre étude).

# **Conclusion et perspectives**

Le travail présenté fait partie du projet WAVES initié en 2002 dans l'équipe Réseaux et Protocoles du LIMOS de Clermont-Ferrand. Ce projet a pour but l'étude du comportement d'un réseau local sans fil dans un cadre industriel. Pour cela il s'appuie sur une application générique dont le but est de contrôler des mobiles disposant d'un système embarqué et évoluant sur un circuit dont le tracé est connu, via un réseau au standard 802.11. Certains de ces mobiles sont impliqués dans une ou plusieurs coopérations, ce qui les conduit généralement à échanger des informations contraintes par le temps.

Pour échanger ses informations avec les autres mobiles (position, vitesse,...), chaque mobile évoluant dans le réseau de WAVES doit prendre part à un cycle de transmission (si possible périodique) commun.

Dans le domaine industriel, les conditions de propagation sont souvent complexes en raison de la présence d'obstacles sur le trajet des ondes radio (machines, cloison,...). Pour une étude basée sur la simulation, les modèles de propagation proposés par les simulateurs comme NS2 ou OPNET ont été conçus pour des environnements plus simples. L'usage du modèle « Free space » peut être assimilé à une erreur de démarche car les résultats obtenus sont bien trop optimistes et peu pertinents. Néanmoins, il n'existe pas de modèle générique d'applications industrielles, il n'est donc pas facile d'imaginer un modèle comme solution unique et universelle. Dans cette thèse nous avons choisi de paramétrer un modèle de propagation générique pour qu'il colle aux conditions mesurées.

Le protocole CSMA/CA est un protocole qui gère l'accès au canal radio en réalisant un arbitrage basé sur le temps. Ceci cause beaucoup des problèmes par rapport au délai de transmission entre les mobiles évoluant dans une cellule 802.11. Les recherches que nous avons faites montrent qu'en utilisant le protocole CSMA/CA, le délai d'accès croît rapidement quand le nombre des stations et/ou la charge du réseau augmentent.

Ces recherches indiquent clairement que le protocole de base CSMA/CA possède des performances non directement compatibles avec les objectifs et les caractéristiques « temps réel » des applications que nous envisageons dans cette étude.

L'objectif dans cette thèse consiste à chercher à minimiser le cycle de transmission des informations temps réel entre mobiles évoluant dans un réseau Wi-Fi industriel. La solution étudiée est évaluée à partir d'un travail de simulation fait avec l'outil NS2.

Ceci nous a conduit à organiser notre travail en deux grandes étapes : la première consiste à trouver le modèle de propagation le mieux adapté à WAVES et aux conditions industrielles, la deuxième a pour but de minimiser le temps d'un cycle dans WAVES.

### **Choix d'un modèle de propagation pertinent pour l'environnement de WAVES :**

Dans la première étape nous avons cherché un modèle de propagation qui puisse être fidèle aux conditions de propagation d'un milieu industriel tel que celui de WAVES. Dans cette recherche nous avons essayé plusieurs modèles existant comme:

- le Free Space model;
- le Shadowing model;
- le Modèle ITU1238.

Cette recherche a montré que le modèle ITU1238 est le plus intéressant pour les conditions de propagation de WAVES.

Puisque la taille optimale d'une cellule dépend des conditions de propagation donc indirectement du modèle de propagation, nous avons trouvé que la taille de la cellule optimale qui correspond à WAVES a un rayon égal à 30 m environ.

### **Optimisation de la durée d'un cycle d'échanges entre mobiles coopérants**

Pour minimiser la durée du cycle d'échanges entre les mobiles, nous avons travaillé sur plusieurs axes :

- trouver la méthode d'échanges optimale entre les mobiles ;
- trouver une variante de l'algorithme de Back-off qui minimise le temps de transmission entre les entités communicantes.

Sur le premier point, la solution consiste à travailler sur deux méthodes :

- une méthode « multiple unicast » basée sur le mécanisme de multicast ;
- une méthode « Pseudo-PCF » inspirée du PCF (Point Coordination Function) de la norme 802.11 qui exploite l'existence d'une table d'informations dans le point d'accès qui stocke les informations des mobiles ayant besoin de coopérer.

Pour notre domaine industriel les résultats obtenus par multiple unicast ont montré l'inefficacité de cette méthode quand le nombre des mobiles augmente dans un groupe multicast.

Les résultats obtenus par la méthode Pseudo-PCF montrent qu'elle est performante pour notre domaine. Ils ont montré que pour avoir un temps de cycle court il est intéressant d'utiliser la table d'information dans le point d'accès associée à la méthode pseudo-PCF.

Après ce travail sur les stratégies d'échanges entre les mobiles dans WAVES, nous nous sommes consacrés à l'amélioration du mécanisme de Back-off pour minimiser le temps de cycle entre les mobiles. Notre étude consiste à modifier l'algorithme de Back-off en changeant deux de ses paramètres principaux.

En cas de succès la fenêtre de contention est décrémentée par une valeur  $b$  telle que  $0 < b < 2$ .

A chaque échec, la taille de la fenêtre de contention (CW) est multipliée par une valeur  $a$  telle que :  $1 < a < 2$ .

Notre but était de trouver les valeurs optimales de  $a$  et de  $b$  qui correspondent à WAVES.

Les résultats obtenus ont montré que pour notre domaine applicatif, les valeurs  $a = 1.4$  et  $b = 1.2$  sont les valeurs optimales.

En comparant les résultats obtenus (pour  $a = 1.4$  et  $b = 1.2$ ) avec les résultats obtenus par le BEB classique et trouvés dans la bibliographie [Bia96], nous avons montré que notre méthode est plus performante que BEB car elle a donné :

- un temps de transmission plus petit entre les mobiles ;
- une capacité plus grande pour la charge d'une cellule.

Cette contribution au projet WAVES nous permet aussi d'introduire un certain nombre de perspectives.

La méthode Pseudo-PCF ne prend en compte ni le trafic additionnel venant du serveur d'application ni les effets de la concurrence pour accéder au médium si la période  $T$  devient plus petite que  $T_{\text{multicast}}$ . Des futures études seront réalisées pour simuler le  $T_{\text{multicast}}$  en prenant en compte ces types de trafic.

Pour la stratégie multiple unicast, nous faisons l'hypothèse probable que le mode d'économie d'énergie n'est pas employé par nos échanges radio entre mobiles pendant leur coopération. Ceci s'explique par le fait que nous avons admis que les énergies mécaniques mises en jeu pour les mobiles de WAVES rendaient négligeable celle nécessaire à une transmission Wi-Fi. On peut maintenant imaginer des applications avec des mobiles plus contraints énergiquement et susceptibles de communiquer avec des stations qui devront être autonomes en énergie (des balises gérant l'accès à un ascenseur par exemple). Pour cela, nous avons besoin de trouver une amélioration de cette méthode qui prendra en considération le mode d'économie d'énergie pour l'ensemble des stations.

Pour les méthodes d'échanges, nous avons fait la plupart de nos simulations pour une seule cellule. Pour les faire dans plusieurs cellules, plusieurs problèmes existent :

- le problème de la mise à jour de la table des informations. Qui va prendre l'initiative de gérer cette table pour une coopération donnée ?
- le problème de la gestion du cycle d'échange. Quel point d'accès a le droit de gérer le cycle des échanges que nous avons proposé ?

Dans des futurs travaux, nous aurons besoin d'étudier l'effet de ces méthodes d'échanges en utilisant plusieurs cellules et en prenant donc en considération ces remarques.

Le changement d'une cellule à une autre (Handover) n'a pas été traité dans notre travail. Or, lors de la réalisation du « Handover » un mobile devient inaccessible pendant un instant non négligeable [Her06] par rapport aux temps que nous avons manipulés. De nouvelles études seront donc nécessaires pour quantifier l'effet de « Handover » sur les performances des méthodes d'échanges (Pseudo-PCF et multiple unicast).

Pour modifier l'algorithme du Back-off, nous avons choisi une méthode linéaire (en mode d'échec de transmission nous augmentons de  $a$  et en cas de succès de transmission nous diminuons de  $b$  la fenêtre de tirage au sort). D'autres recherches sur le Back-off ont été faites en utilisant la méthode multiplicative ou des méthodes exponentielles. Pour cela, dans le futur, il faudra étudier la performance de Back-off en utilisant la méthode multiplicative ou exponentielle dans le contexte du projet WAVES.

Dans cette thèse, nous avons travaillé sur deux axes :

- la modification des méthodes d'échanges entre les mobiles ayant besoin de coopérer entre eux ;
- la modification de l'algorithme de Back-off standard (BEB).

Ces deux points ont été traités de façon indépendante. Des études futures seront réalisées en fusionnant ces deux parties en une seule. Ceci permettra d'aborder une étape de simulation pour trouver la valeur moyenne du temps du cycle qui mettra en jeu, en même temps, les nouvelles méthodes d'accès multicast et le Back-off modifié.



# **Bibliographie**



- [Ahm99] H. Ahmadi, A. Krishna, and R.O. LaMaire, « Design issues in wireless LANs », *Journal of High Speed Networks, Personal Wireless Communication*, 1999.
- [Ane99] P. Anelli, E. Horlait, « Ns-2: principe de conception et d'utilisation », version 1.3 *laboratoire d'informatique de paris 6*, 1999.
- [Bar07] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince W.C. Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta and Y. Fun Hu, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards", *Computer Communications*, Volume 30, Issue 7, 26 May 2007.
- [Bbe07] [http://www.bb-elec.com/technical\\_library.asp](http://www.bb-elec.com/technical_library.asp), 2007.
- [Ben07] Sabri Benfarhat, « rapport interne équipe réseau et protocole », LIMOS, Clermont Ferrand, 2007.
- [Bia00] Giuseppe Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, Number 3, March 2000.
- [Bia96] Giuseppe Bianchi, Luigi Fratta, Matteo Oliveri, "Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs", in: *Proc. of IEEE PIMRC'96*, October 1996.
- [Bin02] Benny Bing, "Wireless Local Area Networks", Wiley-Interscience, 2002.
- [Blu01] Bluetooth V1.1 Specification (Core), Bluetooth SIG, 2001.
- [Blu07] Bluetooth.org – The Official Bluetooth Membership Site, <http://www.bluetooth.org>.
- [Bou04] Pierre-Olivier BOURGEOIS - Alexis MARCOU, « La sécurité dans IEEE 802.11 », août 2004.
- [Byu05] Byung-Jae Kwak, Nah-Oak Song, Miller, "Performance analysis of exponential backoff", *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, volume 13, issue 2, april 2005.
- [Car03] M. M. Carvalho, J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Delay analysis of IEEE 802.11 in single-hop networks", *Proc. of IEEE ICNP*, Nov. 2003.
- [Car06] Carlos Cardeira, Ronald Schoop, « Réseaux sans fil pour l'automatisation », *Jautomatise* N° 48 - Septembre-Octobre 2006.
- [Cha04] Chae Y. Lee, Hee K. Cho, "Multiple multicast tree allocation in IP network", *Computers & Operations Research*, Volume 31, Issue 7, June 2004.
- [Che98] K. Cheun and S. Kim, "Joint delay-power capture in spread-spectrum packet radio networks". *IEEE Transaction on Communications*, 1998.
- [Chi06] J. Chittamuru, A. Ramanathan, M. Sinha, "Simulation of Point Coordination Function for IEEE 802.11 Wireless LAN using Glomosim", 2006.

- [Chu05] Chunyu Hu, Hwangnam Kim, and Jennifer C. Hou, "An Analysis of the Binary Exponential Backoff Algorithm in Distributed MAC Protocols", UIUCDCS-R-2005-2599 (UILU-ENG-2005-1794), July 2005.
- [Cirr02] "Wireless Communications for Industrial Applications", Cirronet White Paper, Summer 2002.
- [Dan99] N.DANIELE et al., « communication radio en milieu perturbé. Une solution : l'étalement de spectre par séquence directe. Principes, avantages, mise en œuvre et applications », INNOCAP99, avril 99.
- [Dev93] Daniel DEVARSIRVATHAM, Theodore RAPPAPORT, "Radiowave propagation measurements & modeling for personal communications", Tutorial 4, IEEE International Conference on Communications ICC'93, Geneva, Switzerland, May 27, 1993.
- [Ebe00] Jean-pierre Ebert, Adam Wolisz, "A performance comparison of point and distributed coordination function", MOMUC, 2000.
- [Erg04] Sinem Coleri Ergen, "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary", Berkeley, September 2004
- [Fah05] FAHS Walid, BAKHACHE Bacem, JACQUET Frédérique, MISSON Michel, « Stratégies de Multicast contraint par le temps au sein d'un WLAN », JDIR 2005, proceeding P.108-115.
- [Fah06a] Walid Fahs, Bassem Bakhache, Frédérique Jacquet, Michel MISSON, "Multicast Strategies for Robots moving within the coverage of a WLAN", VTC Fall 2006, Canada.
- [Fah06b] W. Fahs, B.Bakhache, M. Misson, and F. Jacquet, "Study of a Wireless Medium Access Method inspired from PCF for industrial applications", IEEE ICTTA Spring 2006, Ref. ICTTA405.
- [Far06] Jahanzeb Farooq, Bilal Rauf, "Implementation and Evaluation of IEEE 802.11e Wireless LAN .in GloMoSim", rapport de master, 2006
- [Fre95] Antonio FREITAS, « Etude de la transposition de la méthode d'accès « jeton sur bus » pour un réseau de stations nomades dialoguant par infrarouge dans une configuration multi sauts », Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, 1995.
- [Fri46] Friis, H.T., "A Note on a Simple Transmission Formula", 1946.
- [Ger91] E. Geraniotis and M. Soroushnejad, "Probability of Capture and Rejection of Primary Multiple Access Interference in Spread Spectrum Networks", IEEE Trans.on Communications, 39(6), 1991.
- [Gou67] G. Goudet, « applications des équations de Maxwell », éditions Masson 1967.

- [Goo88] Jonathan Goodman, Albert G. Greenberg, Neal Madras, Peter March, “Stability of binary exponential backoff”, Journal of the ACM (JACM), Volume 35 , Issue 3 (July 1988) Pages: 579 - 602 .
- [Gui06] Celine Guilleminot, « Etude et intégration numérique d’un système multicapteurs AMRC de télécommunication basé sur un prototype virtuel utilisant le langage de haut niveau VHDL-AMS », équipe ICARE toulouse, 2006.
- [Har04] Lawrence J. Harte, “Introduction to Bluetooth, Technology, Market, Operation, Profiles, and Services”, Althos Publeshing, 2004.
- [Hed04] Mustapha Hedabou, Pierre Pinel, Lucien B\_en\_eteau, “A comb method to render ECC resistant against Side Channel Attacks”, 2004.
- [Her03] Sébastien HERNANDEZ, Patrick LAFARGUETTE, Michel MISSON, « Spécification d’une Plateforme pour l’Evaluation de 802.11 : Echanges Inter Mobiles dans une Cellule », Colloque national de la recherche en IUT (CNRIUT), Tarbes, 15 et 16 mai 2003.
- [Her04] Sébastien Hernandez, Patrick Lafargette, Antonio Freitas, Michel Misson, “FIRST evaluations of a simulation Architecture of the Use of an IEEE 802.11 WLAN in industrial Context”, IEEE Wireless Communications and networking conference, Atlanta 2004.
- [Her06] Sebastien Hernandez, Evaluation et optimisation du mécanisme de ‘Handover’ dans un réseau local sans fil dédié aux applications à trafic contraint par le temps, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, 2006.
- [Hop03] P. Hoppenot, « Le réseau CAN », université d’évry, 2003.
- [Hpl07] [http://www.hpl.hp.com/personal/Jean\\_Tourrilhes](http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes).
- [Iee97] IEEE 802.11-1997, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)”, 1997.
- [If07] <http://www.ifremer.fr/francais>
- [Itu05] Recommendation ITU-R P.1238-4, “Propagation data and prediction method for the planning of indoor radio communication systems and local area networks in the frequency range of 900 MHz to 100 GHz”, 2005.
- [Ixa06] <http://www.ixarm.com/Fiche-industrie-de-CYBERNETIX>.
- [Jac04] F.Jacquet, P.Lafargette, P. Llamas, M.Misson, “A multicast Approach for exchange between co-operating mobiles in an 802.11 WLAN”, The 8<sup>th</sup> Multi-Conference on systemics cybernetics and informatics SCI 2004, Proceeding, pp 7-12, Orlando, USA 2004.

- [Jac00] Frédérique Jacquet, « Etude d'une stratégie de communication Multi-liens pour stations mobiles évoluant en site hostile », Mémoire de thèse, Clermont Ferrand décembre 2000.
- [Kez05] Ryad Ben-El-Kezadri, Wafa Beyarrana, Mériam Ben Ghorbe, « Evaluation des performances d'un réseau infrastructure 802.11 en environnement confiné », SETIT 2005.
- [Laf03] Patrick Lafargette, « Optimisation du trafic intracellulaire d'un réseau local sans fil dans un contexte industriel », Mémoire CNAM de clermont ferrand 2003.
- [Lau92] C.T. Lau and C. Leung, "Capture Models for Mobile Packet Radio Networks". IEEE Transactions on Communications, page 917, 1992.
- [Lep91] F.LEPAGE et al., « Les réseaux locaux industriels », 2<sup>ème</sup> édition, HERMES, 1991.
- [Liu00] Jane W. S. Liu, "Real-Time Systems, University of Illinois at Urbana-champaign", Person education, 2000.
- [Lla06] Philippe LLAMAS, « Etude de l'adaptation des fonctionnalités des points d'accès d'un réseau sans fil 802.11 pour des applications temps réel », Mémoire CNAM, 2006.
- [Loh07] Stéphane Lohier, « Implémentation de la procédure 802.11 ARF dans le simulateur NS-2 », 2007.
- [Luc03] Gilberto flores Lucio, Marcos Paredes-Farrera, Emmanuel Jammeh, Martin Fleury, Martin J.Reed, Opnet Modeler and NS2: comparing the accuracy of network simulator for packet-level analysis using a network testbed, WSEAS Transactions on Computers, Issue 3, Volume 2:700-707 July 2003.
- [Mal02] Davor MALES et Guy PUJOLLE, « Le wifi par la pratique », Edition Eyrolles ISBN : 2- 212-11120-7 - Septembre 2002.
- [Man05] Saher S. Manaseer, Mohamed Ould-Khaoua, "Logarithmic Based Backoff Algorithm for MAC Protocol in MANETs", 2005.
- [Mar02] P. S. Marshall; "Industrial Ethernet", ISA Press, (ISBN 1-55617-869-7), 2002.
- [Mar03] Jean-Marc CHARTRES, « Réseaux sans fil, mais en sécurité », Jautomatise N°30 - Septembre-Octobre 2003.
- [Mcc06] Patrick McCurdy, Ira Sharp, "Exploring New Wireless Technologies for Industrial Applications", Presented at ISA Expo 2006.
- [Met76] J.J. Metzner, "On improving utilization in ALOHA networks". IEEE Trans. Commun., page 447, 1976.
- [Mis05] Michel Misson, cours de Master Réseau, 2005.
- [Muh02] Paul Mühlethaler, « 802.11 et les réseaux sans fil », Eyrolles, 2002.

- [Mut89] K. Mutsuura, H. Okada, K. Ohtsuki, and Y. Tezuka, "A New control scheme with capture effect for random access packet communications", In Proc. IEEE GLOBECOM, page 938, 1989.
- [Nak05] Nakjung Choi, Yongho Seok, Yanghee Choi, Sungmann Kim, Hanwook Jung, "Enhanced backoff scheme for the IEEE 802.11 DCF", Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. Volume 3, Issue , 30 May-1 June 2005 Page(s): 2067 - 2070 Vol. 3.
- [Ns06 ] Tutorial for the Network Simulator NS, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/>, 2006.
- [Ns07] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [Oba98] Shuichi Obayashi, "A Body-Shadowing Model for Indoor Radio Communication Environments", 1998.
- [Opn07] [www.opnet.com](http://www.opnet.com).
- [Pey04] Jean-François Peyrucat, « Les liaisons radio », Mesures 767, page 70, septembre 2004.
- [Pil04] Jean-François Pillou, « introduction au Wifi (802.11) », 2004.
- [Pro07] John G. Proakis, Massoud Salehi, "Digital communications", McGraw Hill Higher Education, 2007
- [Rap96] T. S. Rappaport, "Wireless communications, principles and practice", Prentice Hall, 1996.
- [Sta01] William Stallings, "Local Networks", Sixth Edition, Macmillan, 2001.
- [Std99] SO/IEC Std 8802-11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification", 1999.
- [Tia03] Tian, S. Csaba, T. Lohmar, H.-Y. Lach, R. Tafazolli, C. Janneteau, "comparison of three approaches towards mobile multicast", Y. IST Mobile Summit 2003, Aveiro, Portugal, 16-18 June 2003.
- [Val94] Thierry Val, « Etude d'un réseau local hybride d'intérieur permettant l'interconnexion de stations fixes et de stations mobiles », Rapport de thèse 1994.
- [Van07] Adrien van den boosch, « Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles », ICARE Toulouse 2007.
- [Vas04] A. Vasan, A. Kochut, and A. U. Shankar, "Sniffing out the correct Physical Layer Capture model in 802.11b", Technical Report UMIACS-TR-2004-26 and CS-TR-4583, Department of Computer Science, University of Maryland College Park, April 2004.
- [Vel03] Hadzi-Velkov, Z., Spasenovski, B., "An analysis of CSMA/CA protocol with capture in wireless LANs", Wireless Communications, March 2003.

- [War01] C. Ware, J.F. Chicharo, and T. Wysocki, “Modelling of capture behaviour in ieee 802.11 radio modems”, IEEE International Conference on Telecommunications, 2001.
- [Zig07] ZigBee Alliance, <http://www.caba.org/standard/zigbee.html>.
- [Zio02] Eustathia Ziouva, Theodore Antonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis”, Computer Communications, 2002.



# **Glossaire**



**AFH:** Adaptive frequency-hopping spread spectrum  
**AGV:** Automated Guided Vehicles  
**AODV:** Ad hoc On-Demand Vector Routing  
**ARP:** Address Resolution Protocol  
**ART:** Autorité de Régulation des Télécommunications  
**ATM:** Asynchronous Transfer Mode  
**AUV:** Autonomous Underwater Vehicle  
**BEB:** Binary Exponential Backoff  
**BSS:** Basic Service Set  
**BSSID:** Basic Set Service Identifier  
**CAN:** Controller Area Network  
**CBR:** Centralized Bandwidth Reservation  
**CDMA:** Code Division Multiple Access  
**CSMA/CA:** Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance  
**CSMA/CD:** Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection  
**CTS:** Clear To Send  
**CW:** Contention Window  
**DARPA:** Defense Advanced Research Projects Agency  
**DCF:** Distributed Coordination Function  
**DECT:** Digital Enhanced Cordless Telephone  
**DIFS:** DCF Inter-Frame Spacing  
**DSSS:** Direct Sequence Spread Spectrum  
**DTIM:** Delivery Traffic Indication Message  
**EIFS:** Extended Inter-Frame Spacing  
**ESSID:** Extended Service Set ID  
**ETSI:** European Telecommunications Standards Institute  
**FDDI:** Fiber Distributed Data Interface  
**FDMA:** Frequency Division Multiple Access  
**FER:** Frame Error Rate  
**FHSS:** Frequency Hopping Spread Spectrum  
**FTP:** File Transfer Protocol  
**GFSK:** Gaussian Frequency Shift Keying  
**GSM:** Global System for Mobile communication  
**HiperLAN:** High Performance Local Area Network

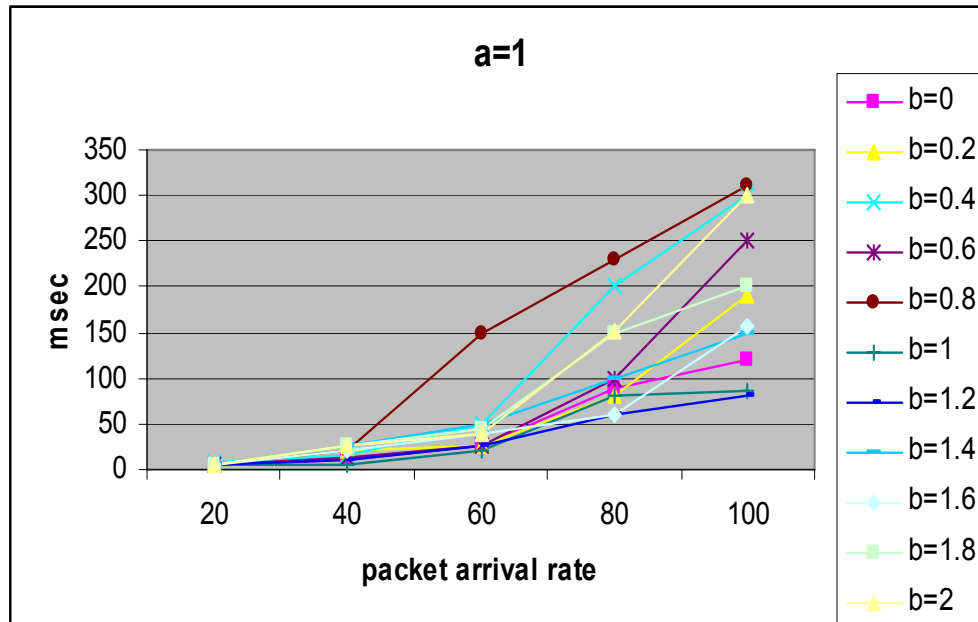
**IBM:** International Business Machines Corporation  
**IEEE:** Institute of Electrical and Electronic Engineer  
**IFS:** Inter-Frame Spacing  
**ISI:** Intersymbol Interference  
**ISM :** Instrumentation Scientifique et Médical  
**ITU:** International Telecommunication Union  
**LLC:** Logical Link Control  
**LMF:** Leicht Manipular Fahrzeug  
**MAC:** Media Access Control  
**NS2:** Network Simulator 2  
**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
**OPNET:** Optimum Network Performance  
**OSI:** Open System Interconnect  
**OTCL:** Object Tools Command Language  
**PCF:** Point Coordination Function  
**PCMCIA:** Personal Computer Memory Card International Association  
**PDA:** Personal Digital Assistant  
**PIFS:** PCF Inter-Frame Spacing  
**ROV:** Remotly Operated Vehicule  
**RTS:** Request To Send  
**SIFS:** Short Inter-Frame Spacing  
**SIG:** Bluetooth Special Interest Group  
**TCP/IP:** Transmission Control Protocol/Internet Protocol  
**TDD:** Time Division Duplex  
**TDMA:** Time Division Multiple Access  
**TTR:** Traffic Temps Réel  
**UDP:** User Datagram Protocol  
**USC/ISI:** University of Southern California's Information Sciences Institute  
**VCS:** Virtual Carrier Sense  
**VINT:** Virtual InterNetwork Testbed  
**WAVES:** Wi-Fi for Automatic guided vehicules  
**Wi-Fi:** Wireless Fidelity  
**WLAN:** Wireless Local Area Network



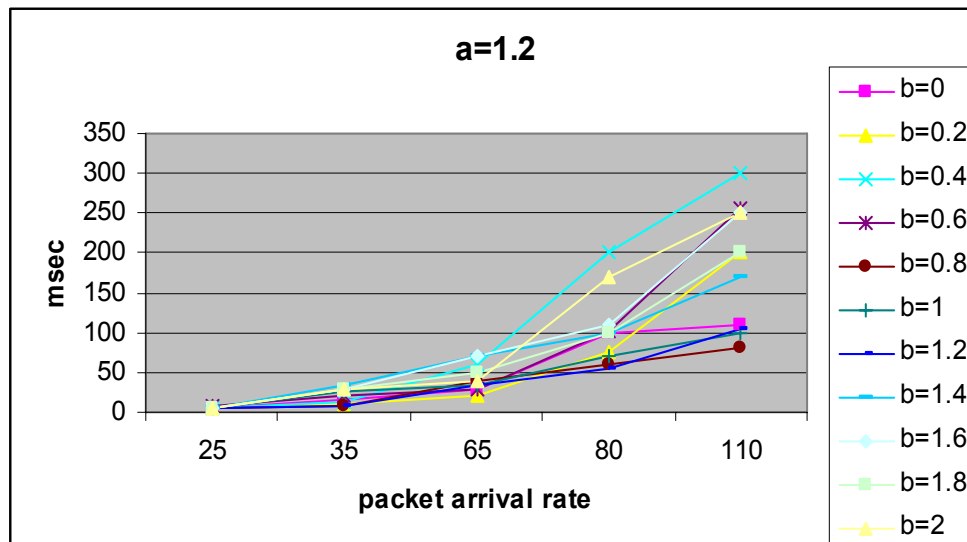
# **Annexe A**

Résultats obtenus par les simulations de Back-off modifié :

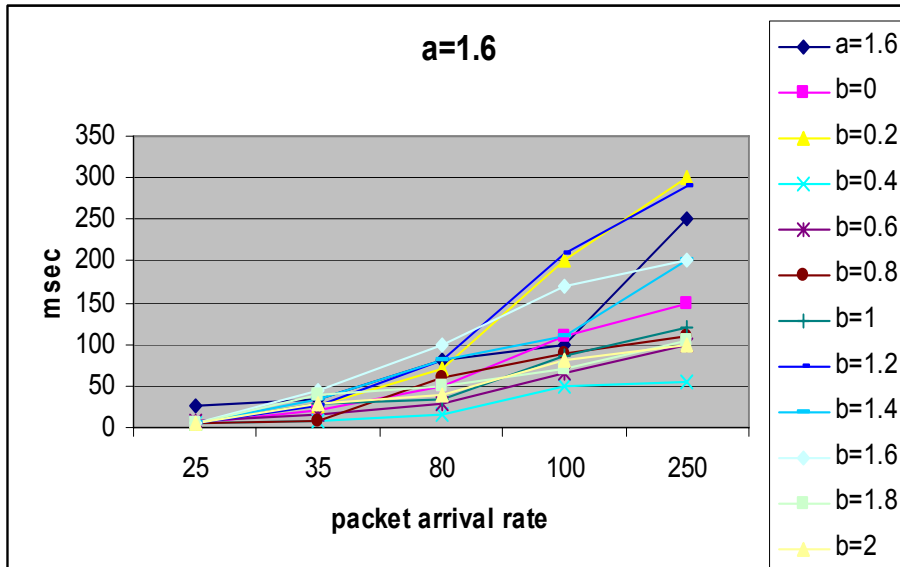
1- Back-off modifié avec  $a=1$  et  $b$  varie de 0 jusqu'à 2.



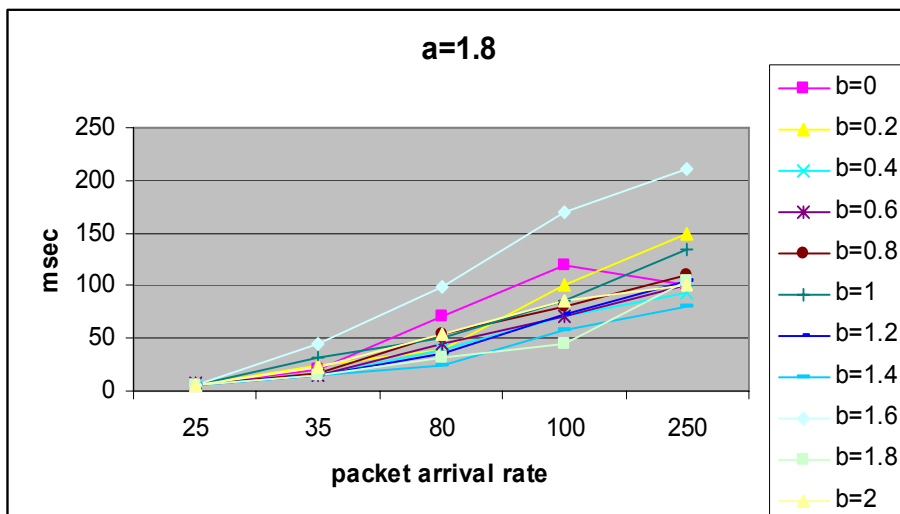
2- Back-off modifié avec  $a=1.2$  et  $b$  varie de 0 jusqu'à 2.



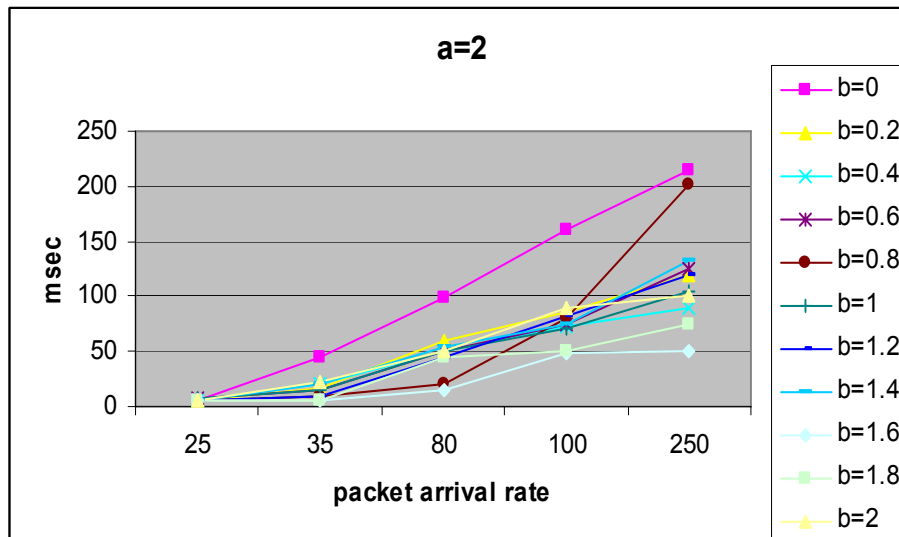
3- Back-off modifié avec  $a=1.6$  et  $b$  varie de 0 jusqu'à 2.



4- Back-off modifié avec  $a=1.8$  et  $b$  varie de 0 jusqu'à 2.



5- Back-off modifié avec  $a=2$  et  $b$  varie de 0 jusqu'à 2.



# **Annexe B**



## Modèle de propagation sous NS2 :

Sous NS2, il existe plusieurs modèles de propagation :

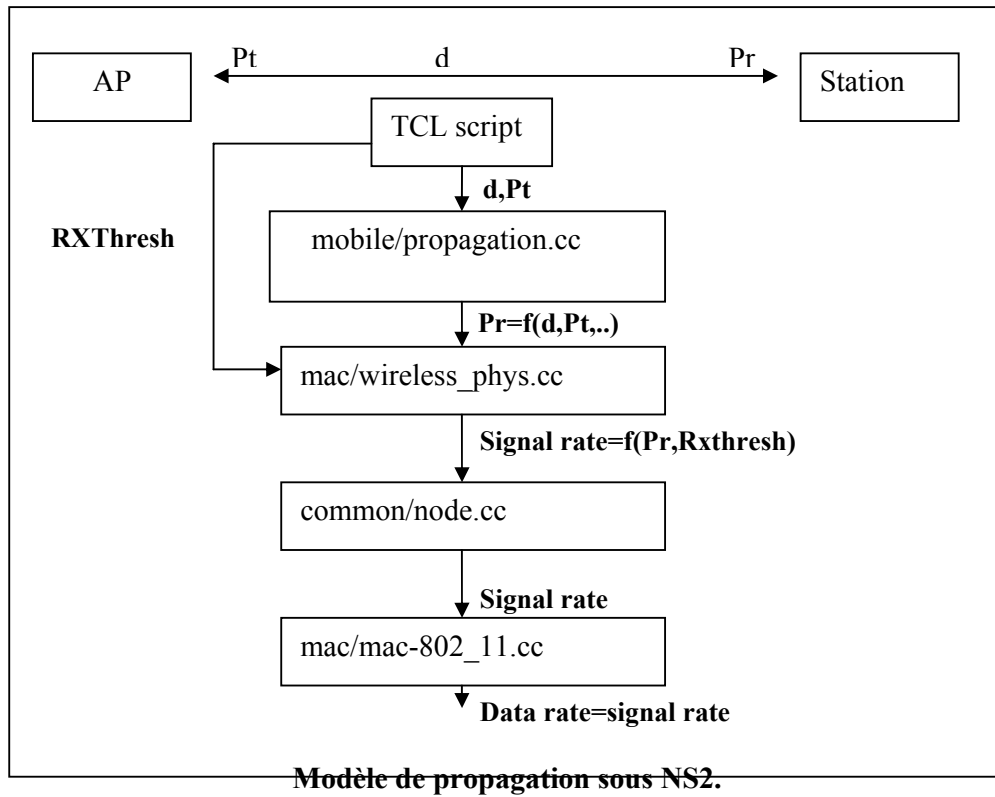
- Free space
- Shadowing
- Two-ray-ground

Le modèle utilisé par défaut est le « free space ». Il exprime sous la forme du Path Loss la relation entre la puissance reçue  $P_r$  et celle transmise  $P_t$ . Cette relation est donnée par :

$$PathLoss = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d^2) L}$$

**$G_t$**  et  **$G_r$**  sont les gains en émission et en réception liés au modèle des antennes utilisées.  **$\lambda$**  est la longueur d'onde correspondante à la fréquence du canal choisi et  **$L$**  est un facteur de pertes qui peut être introduit à ce niveau ( $L=1$  sans pertes) comme variable d'ajustement.

La figure Suivante montre les différentes variables utilisées par le modèle ainsi que les fichiers et les fonctions C associées.



#### 1- Mobile/propagation.cc

```
#include <stdio.h>
#include <topography.h>
#include <propagation.h>
#include <wireless-phy.h>

class PacketStamp;
int Propagation::command(int argc, const char*const* argv)
{
    TclObject *obj;

    if(argc == 3)
    {
        if( (obj = TclObject::lookup(argv[2])) == 0)
        {
            fprintf(stderr, "Propagation: %s lookup of %s failed\n", argv[1],
                argv[2]);
            return TCL_ERROR;
        }

        if (strcasecmp(argv[1], "topography") == 0)
        {
            topo = (Topography*) obj;
            return TCL_OK;
        }
    }
    return TclObject::command(argc, argv);
}
```

```

/* As new network-intefaces are added, add a default method here */

Double Propagation::Pr(PacketStamp *, PacketStamp *, Phy *)
{
    fprintf(stderr, "Propagation model %s not implemented for generic
NetIF\n",
        name);
    abort();
    return 0; // Make msvc happy
}

Double Propagation::Pr(PacketStamp *, PacketStamp *, WirelessPhy *)
{
    fprintf(stderr,
        "Propagation model %s not implemented for SharedMedia
interface\n",
        name);
    abort();
    return 0; // Make msvc happy
}

Double Propagation::getDist(double Pr, double Pt, double Gt, double Gr,
double hr,
        double ht, double L, double lambda)
{
    fprintf(stderr,
        "Propagtion model %s not implemented for generic use\n",
name);
    abort();
    return 0;
}

double Propagation::Friis(double Pt, double Gt, double Gr, double lambda,
double L, double d)
{
    /*
    * Friis free space equation:
    *
    *      Pt * Gt * Gr * (lambda^2)
    *  P = -----
    *      (4 * pi * d)^2 * L
    */
    if (d == 0.0) //XXX probably better check < MIN_DISTANCE or some
such
        return Pt;
    double M = lambda / (4 * PI * d);
    return (Pt * Gt * Gr * (M * M)) / L;
}

// methods for free space model
static class FreeSpaceClass: public TclClass {
public:
    FreeSpaceClass() : TclClass("Propagation/FreeSpace") {}
    TclObject* create(int, const char*const*) {
        return (new FreeSpace);
    }
} class_freespace;

```

```

double FreeSpace::Pr(PacketStamp *t, PacketStamp *r, WirelessPhy *ifp)
{
    double L = ifp->getL();           // system loss
    double lambda = ifp->getLambda(); // wavelength

    double Xt, Yt, Zt;               // location of transmitter
    double Xr, Yr, Zr;               // location of receiver

    t->getNode()->getLoc(&Xt, &Yt, &Zt);
    r->getNode()->getLoc(&Xr, &Yr, &Zr);

    // Is antenna position relative to node position?
    Xr += r->getAntenna()->getX();
    Yr += r->getAntenna()->getY();
    Zr += r->getAntenna()->getZ();
    Xt += t->getAntenna()->getX();
    Yt += t->getAntenna()->getY();
    Zt += t->getAntenna()->getZ();

    double dX = Xr - Xt;
    double dY = Yr - Yt;
    double dZ = Zr - Zt;
    double d = sqrt(dX * dX + dY * dY + dZ * dZ);

    // get antenna gain
    double Gt = t->getAntenna()->getTxGain(dX, dY, dZ, lambda);
    double Gr = r->getAntenna()->getRxGain(dX, dY, dZ, lambda);

    // calculate receiving power at distance
    double Pr = Friis(t->getTxPr(), Gt, Gr, lambda, L, d);
    printf("%lf: d: %lf, Pr: %e\n", Scheduler::instance().clock(), d,
Pr);

    return Pr;
}

double
FreeSpace::getDist(double Pr, double Pt, double Gt, double Gr, double hr,
double ht, double L, double lambda)
{
    return sqrt((Pt * Gt * Gr * lambda * lambda) / (L * Pr)) /
(4 * PI);
}

```

## 2-wireless-phy.cc

```

*/
#include <math.h>

#include <packet.h>

#include <mobilenode.h>
#include <phy.h>
#include <propagation.h>
#include <modulation.h>
#include <omni-antenna.h>
#include <wireless-phy.h>
#include <packet.h>
#include <ip.h>

```

```

#include <agent.h>
#include <trace.h>

#include "diffusion/diff_header.h"

#define MAX(a,b) (((a)<(b))?(b):(a))

void Sleep_Timer::expire(Event *) {
    a_>UpdateSleepEnergy();
}

/* =====
   WirelessPhy Interface
   =====
*/
static class WirelessPhyClass: public TclClass {
public:
    WirelessPhyClass() : TclClass("Phy/WirelessPhy") {}
    TclObject* create(int, const char*const*) {
        return (new WirelessPhy);
    }
} class_WirelessPhy;

WirelessPhy::WirelessPhy() : Phy(), sleep_timer_(this), status_(IDLE)
{
    /*
     * It sounds like 10db should be the capture threshold.
     *
     * If a node is presently receiving a packet a a power level
     * Pa, and a packet at power level Pb arrives, the following
     * comparion must be made to determine whether or not capture
     * occurs:
     *
     *  $10 * \log(Pa) - 10 * \log(Pb) > 10db$ 
     *
     * OR equivalently
     *
     *  $Pa/Pb > 10.$ 
     */
    bind("CPTresh_", &CPTresh_);
    bind("CSTresh_", &CSTresh_);
    bind("RXThresh_", &RXThresh_);
    //bind("bandwidth_", &bandwidth_);
    bind("Pt_", &Pt_);
    bind("freq_", &freq_);
    bind("L_", &L_);

    lambda_ = SPEED_OF_LIGHT / freq_;

    node_ = 0;
    ant_ = 0;
    propagation_ = 0;
    modulation_ = 0;

    // Assume AT&T's Wavelan PCMCIA card -- Chalermek
    // Pt_ = 8.5872e-4; // For 40m transmission range.
    // Pt_ = 7.214e-3; // For 100m transmission range.
    // Pt_ = 0.2818; // For 250m transmission range.

```

```

//      Pt_ = pow(10, 2.45) * 1e-3;          // 24.5 dbm, ~ 281.8mw

Pt_consume_ = 0.660; // 1.6 W drained power for transmission
Pr_consume_ = 0.395; // 1.2 W drained power for reception

//      P_idle_ = 0.035; // 1.15 W drained power for idle

P_idle_ = 0.0;
P_sleep_ = 0.00;
P_transition_ = 0.00;
node_on_=1;

channel_idle_time_ = NOW;
update_energy_time_ = NOW;
last_send_time_ = NOW;

sleep_timer_.resched(1.0);

}

int
WirelessPhy::command(int argc, const char*const* argv)
{
    TclObject *obj;

    if (argc==2) {
        if (strcasecmp(argv[1], "NodeOn") == 0) {
            node_on();

            if (em() == NULL)
                return TCL_OK;
            if (NOW > update_energy_time_) {
                update_energy_time_ = NOW;
            }
            return TCL_OK;
        } else if (strcasecmp(argv[1], "NodeOff") == 0) {
            node_off();

            if (em() == NULL)
                return TCL_OK;
            if (NOW > update_energy_time_) {
                em()->DecrIdleEnergy(NOW-update_energy_time_,
                                    P_idle_);
                update_energy_time_ = NOW;
            }
            return TCL_OK;
        }
    }
    } else if(argc == 3) {
        if (strcasecmp(argv[1], "setTxPower") == 0) {
            Pt_consume_ = atof(argv[2]);
            return TCL_OK;
        } else if (strcasecmp(argv[1], "setRxPower") == 0) {
            Pr_consume_ = atof(argv[2]);
            return TCL_OK;
        } else if (strcasecmp(argv[1], "setIdlePower") == 0) {
            P_idle_ = atof(argv[2]);
            return TCL_OK;
        } else if (strcasecmp(argv[1], "setSleepPower") == 0) {
            P_sleep_ = atof(argv[2]);
            return TCL_OK;
        } else if (strcasecmp(argv[1], "setTransitionPower") == 0) {

```

```

        P_transition_ = atof(argv[2]);
        return TCL_OK;
    } else if (strcasecmp(argv[1], "setTransitionTime") == 0) {
        T_transition_ = atof(argv[2]);
        return TCL_OK;
    } else if ( (obj = TclObject::lookup(argv[2])) == 0) {
        fprintf(stderr, "WirelessPhy: %s lookup of %s
failed\n",
                argv[1], argv[2]);
        return TCL_ERROR;
    } else if (strcmp(argv[1], "propagation") == 0) {
        assert(propagation_ == 0);
        propagation_ = (Propagation*) obj;
        return TCL_OK;
    } else if (strcasecmp(argv[1], "antenna") == 0) {
        ant_ = (Antenna*) obj;
        return TCL_OK;
    } else if (strcasecmp(argv[1], "node") == 0) {
        assert(node_ == 0);
        node_ = (Node *)obj;
        return TCL_OK;
    }
}
return Phy::command(argc, argv);
}

void
WirelessPhy::sendDown(Packet *p)
{
    /*
     * Sanity Check
     */
    assert(initialized());

    if (em()) {
        //node is off here...
        if (Is_node_on() != true ) {
            Packet::free(p);
            return;
        }
        if (Is_node_on() == true && Is_sleeping() == true){
            em()-> DecrSleepEnergy(NOW-update_energy_time_,
                                P_sleep_);
            update_energy_time_ = NOW;
        }
    }
    /*
     * Decrease node's energy
     */
    if(em()) {
        if (em()->energy() > 0) {

            double txtime = hdr_cmh::access(p)->txtime();
            double start_time = MAX(channel_idle_time_, NOW);
            double end_time = MAX(channel_idle_time_, NOW+txtime);
            double actual_txtime = end_time-start_time;

            if (start_time > update_energy_time_) {
                em()->DecrIdleEnergy(start_time -

```

```

                                update_energy_time_,
P_idle_);
                                update_energy_time_ = start_time;
                                }

                                /* It turns out that MAC sends packet even though, it's
                                receiving some packets.

                                if (txtime-actual_txtime > 0.000001) {
                                    fprintf(stderr,"Something may be wrong at
MAC\n");
                                    fprintf(stderr,"act_tx = %lf, tx = %lf\n",
actual_txtime, txtime);
                                }
                                */

                                // Sanity check
                                double temp = MAX(NOW,last_send_time_);

                                /*
                                if (NOW < last_send_time_) {
                                    fprintf(stderr,"Argggg !! Overlapping
transmission. NOW %lf last %lf temp %lf\n", NOW, last_send_time_, temp);
                                }
                                */

                                double begin_adjust_time = MIN(channel_idle_time_, temp);
                                double finish_adjust_time = MIN(channel_idle_time_,
NOW+txtime);
                                double gap_adjust_time = finish_adjust_time -
begin_adjust_time;
                                if (gap_adjust_time < 0.0) {
                                    fprintf(stderr,"What the heck ! negative gap
time.\n");
                                }

                                if ((gap_adjust_time > 0.0) && (status_ == RECV)) {
                                    em()->DecrTxEnergy(gap_adjust_time,
Pt_consume_-Pr_consume_);
                                }

                                em()->DecrTxEnergy(actual_txtime,Pt_consume_);
                                // if (end_time > channel_idle_time_) {
                                //     status_ = SEND;
                                // }
                                //

                                status_ = IDLE;

                                last_send_time_ = NOW+txtime;
                                channel_idle_time_ = end_time;
                                update_energy_time_ = end_time;

                                if (em()->energy() <= 0) {
                                    em()->setenergy(0);
                                    ((MobileNode*)node())->log_energy(0);
                                }

                                } else {

                                    // log node energy
                                    if (em()->energy() > 0) {

```



```

((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
    }
//
    Packet::free(p);
    return;
}

/*
 * Stamp the packet with the interface arguments
 */
p->txinfo_.stamp((MobileNode*)node(), ant_->copy(), Pt_, lambda_);

// Send the packet
channel_->recv(p, this);
}

int
WirelessPhy::sendUp(Packet *p)
{
    /*
     * Sanity Check
     */
    assert(initialized());

    PacketStamp s;
    double Pr;
    int pkt_recvd = 0;

    Pr = p->txinfo_.getTxPr();

    // if the node is in sleeping mode, drop the packet simply
    if (em()) {
        if (Is_node_on() != true) {
            pkt_recvd = 0;
            goto DONE;
        }

        if (Is_sleeping() == true && (Is_node_on() == true)) {
            pkt_recvd = 0;
            goto DONE;
        }
    }

    // if the energy goes to ZERO, drop the packet simply
    if (em()) {
        if (em()->energy() <= 0) {
            pkt_recvd = 0;
            goto DONE;
        }
    }

    if(propagation_) {
        s.stamp((MobileNode*)node(), ant_, 0, lambda_);
        Pr = propagation_->Pr(&p->txinfo_, &s, this);
        if (Pr < CStresh_) {
            pkt_recvd = 0;
            goto DONE;
        }
        if (Pr < RXThresh_) {
            /*

```

```

        * We can detect, but not successfully receive
        * this packet.
        */
        hdr_cmn *hdr = HDR_CMN(p);
        hdr->error() = 1;

#ifdef DEBUG > 3
        printf("SM %f.9 _%d_ drop pkt from %d low POWER
        %e/%e\n",
                Scheduler::instance().clock(), node()-
        >index(),
                p->txinfo_.getNode()->index(),
                Pr, RXThresh);
#endif
    }
}
if(modulation_) {
    hdr_cmn *hdr = HDR_CMN(p);
    hdr->error() = modulation_->BitError(Pr);
}

/*
 * The MAC layer must be notified of the packet reception
 * now - ie; when the first bit has been detected - so that
 * it can properly do Collision Avoidance / Detection.
 */
pkt_rcvd = 1;

DONE:
p->txinfo_.getAntenna()->release();
p->txinfo_.RxPr = Pr;
p->txinfo_.CPThresh = CPThresh_;

    * Decrease energy if packet successfully received
    */
    if(pkt_rcvd && em()) {

        double rcvtime = hdr_cmn::access(p)->txtime();
        // no way to reach here if the energy level < 0

        double start_time = MAX(channel_idle_time_, NOW);
        double end_time = MAX(channel_idle_time_, NOW+rcvtime);
        double actual_rcvtime = end_time-start_time;

        if (start_time > update_energy_time_) {
            em()->DecrIdleEnergy(start_time-update_energy_time_,
                                P_idle_);
            update_energy_time_ = start_time;
        }

        em()->DecrRcvEnergy(actual_rcvtime, Pr_consume_);

/*
    if (end_time > channel_idle_time_) {
        status_ = RECV;
    }
*/
    channel_idle_time_ = end_time;
    update_energy_time_ = end_time;

    status_ = IDLE;

/*

```

```

        hdr_diff *dfh = HDR_DIFF(p);
        printf("Node %d receives (%d, %d, %d) energy %lf.\n",
            node()->address(), dfh->sender_id.addr_,
            dfh->sender_id.port_, dfh->pk_num, node()->energy());
    */

    // log node energy
    if (em()->energy() > 0) {
        ((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
    }

    if (em()->energy() <= 0) {
        // saying node died
        em()->setenergy(0);
        ((MobileNode*)node())->log_energy(0);
    }
}

return pkt_recvd;
}

void
WirelessPhy::node_on()
{
    node_on_ = TRUE;
    status_ = IDLE;

    if (em() == NULL)
        return;
    if (NOW > update_energy_time_) {
        update_energy_time_ = NOW;
    }
}

void
WirelessPhy::node_off()
{
    node_on_ = FALSE;
    status_ = SLEEP;

    if (em() == NULL)
        return;
    if (NOW > update_energy_time_) {
        em()->DecrIdleEnergy(NOW-update_energy_time_,
            P_idle_);
        update_energy_time_ = NOW;
    }
}

void
WirelessPhy::node_wakeup()
{
    if (status_ == IDLE)
        return;

    if (em() == NULL)
        return;

```

```

        if ( NOW > update_energy_time_ && (status_== SLEEP) ) {
            //the power consumption when radio goes from SLEEP mode to
IDLE mode
            em()->DecrTransitionEnergy(T_transition_,P_transition_);

            em()->DecrSleepEnergy(NOW-update_energy_time_,
                                P_sleep_);
            status_ = IDLE;
            update_energy_time_ = NOW;

            // log node energy
            if (em()->energy() > 0) {
                ((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
            } else {
                ((MobileNode *)node_)->log_energy(0);
            }
        }
    }

void
WirelessPhy::node_sleep()
{
    //
    //     node_on_ = FALSE;
    //
    if (status_== SLEEP)
        return;

    if (em() == NULL)
        return;

    if ( NOW > update_energy_time_ && (status_== IDLE) ) {
        //the power consumption when radio goes from IDLE mode to SLEEP
mode
        em()->DecrTransitionEnergy(T_transition_,P_transition_);

        em()->DecrIdleEnergy(NOW-update_energy_time_,
                            P_idle_);
        status_ = SLEEP;
        update_energy_time_ = NOW;

        // log node energy
        if (em()->energy() > 0) {
            ((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
        } else {
            ((MobileNode *)node_)->log_energy(0);
        }
    }
}

//
void
WirelessPhy::dump(void) const
{
    Phy::dump();
    fprintf(stdout,
        "\tPt: %f, Gt: %f, Gr: %f, lambda: %f, L: %f\n",
+        Pt_, ant_->getTxGain(0,0,0,lambda_), ant_-
>getRxGain(0,0,0,lambda_), lambda_, L_);
    //fprintf(stdout, "\tbandwidth: %f\n", bandwidth_);
    fprintf(stdout, "-----
\n");
}

```

```

}

void WirelessPhy::UpdateIdleEnergy()
{
    if (em() == NULL) {
        return;
    }
    if (NOW > update_energy_time_ && (Is_node_on()==TRUE && status_ ==
IDLE ) ) {
        em()-> DecrIdleEnergy(NOW-update_energy_time_,
                             P_idle_);
        update_energy_time_ = NOW;
    }

    // log node energy
    if (em()->energy() > 0) {
        ((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
    } else {
        ((MobileNode *)node_)->log_energy(0);
    }

    // idle_timer_.resched(10.0);
}

double WirelessPhy::getDist(double Pr, double Pt, double Gt, double Gr,
                             double hr, double ht, double L, double lambda)
{
    if (propagation_) {
        return propagation_->getDist(Pr, Pt, Gt, Gr, hr, ht, L,
                                     lambda);
    }
    return 0;
}

//
void WirelessPhy::UpdateSleepEnergy()
{
    if (em() == NULL) {
        return;
    }
    if (NOW > update_energy_time_ && ( Is_node_on()==TRUE &&
Is_sleeping() == true) ) {
        em()-> DecrSleepEnergy(NOW-update_energy_time_,
                              P_sleep_);
        update_energy_time_ = NOW;
        // log node energy
        if (em()->energy() > 0) {
            ((MobileNode *)node_)->log_energy(1);
        } else {
            ((MobileNode *)node_)->log_energy(0);
        }
    }

    //A hack to make states consistent with those of in Energy Model
for AF
    int static s=em()->sleep();
    if(em()->sleep()!=s){

        s=em()->sleep();
        if(s==1)

```

```

        node_sleep();
    else
        node_wakeup();
    printf("\n AF hack %d\n", em()->sleep());
}

sleep_timer_.resched(10.0);
}

```

### 3- common/node.cc:

```

#include <stdio.h>
#include <stdarg.h>

#include "address.h"
#include "config.h"
#ifdef HAVE_STL
#include "nix/nixnode.h"
#endif //HAVE_STL
#include "node.h"

static class LinkHeadClass : public TclClass {
public:
    LinkHeadClass() : TclClass("Connector/LinkHead") {}
    TclObject* create(int, const char*const*) {
        return (new LinkHead);
    }
} class link head;

LinkHead::LinkHead() : net_if_(0), node_(0), type_(0) {}

int32_t LinkHead::label()
{
    if (net_if_)
        return net_if_->intf label();
    printf("Configuration error: Network Interface missing\n");
    exit(1);
    // Make msvc happy
    return 0;
}

int LinkHead::command(int argc, const char*const* argv)
{
    if (argc == 3) {
        if(strcmp(argv[1], "setnetinf") == 0) {
            net_if_ =
                (NetworkInterface*)
TclObject::lookup(argv[2]);
            if (net_if_ == 0)
                return TCL_ERROR;
            return TCL_OK;
        } else if(strcmp(argv[1], "setnode") == 0) {
            node_ = (Node*) TclObject::lookup(argv[2]);
            if (node_ == 0)
                return TCL_ERROR;
            return TCL_OK;
        }
    }
    return (Connector::command(argc, argv));
}

```

```

static class NodeClass : public TclClass {
public:
    NodeClass() : TclClass("Node") {}
    TclObject* create(int, const char*const*) {
        return (new Node);
    }
} class node;

struct node_head Node::nodehead = { 0 }; // replaces LIST_INIT macro

char Node::nwrk [NODE_NAMLOG_BUFSZ];

/* Additions for NixRouting */
int NixRoutingUsed = -1;

Node::Node() :
    address_(-1), nodeid_(-1), namChan_(0),
    rtnotif_(NULL),
#ifdef HAVE_STL
    nixnode_(NULL),
#endif //HAVE_STL
    energy_model_(NULL), location_(NULL)
{
    LIST_INIT(&ifhead);
    LIST_INIT(&linklisthead);
    insert(&(Node::nodehead)); // insert self into static list of
nodes
#ifdef HAVE_STL
    // Mods for Nix-Vector routing
    if (NixRoutingUsed < 0) {
        // Find out if nix routing is in use
        Tcl& tcl = Tcl::instance();
        tcl.evalf("Simulator set nix-routing");
        tcl.resultAs(&NixRoutingUsed);
    }
    if (NixRoutingUsed) {
        // Create the NixNode pointer
        if(0)printf("Nix routing in use, creating NixNode\n");
        nixnode_ = new NixNode();
    }
#endif //HAVE_STL
    neighbor list = NULL;
}

Node::~Node()
{
    LIST_REMOVE(this, entry);
}

int
Node::command(int argc, const char*const* argv)
{
    Tcl& tcl = Tcl::instance();
    if (argc == 2) {
#ifdef HAVE_STL
        // Mods for Nix-Vector Routing
        if(strcmp(argv[1], "populate-objects") == 0) {
            if (nixnode_) {
                nixnode_>PopulateObjects();
            }
            return TCL_OK;

```

```

    }
    // End mods for Nix-Vector routing
#endif // HAVE_STL
    if(strcmp(argv[1], "address?") == 0) {
        tcl.resultf("%d", address);
        return TCL_OK;
    }

    } else if (argc == 3) {
#ifdef HAVE_STL
        // Mods for Nix-Vector Routing
        if (strcmp(argv[1], "get-nix-vector") == 0) {
            if (nixnode_) {
                nixnode_>GetNixVector(atol(argv[2]));
            }
            return TCL_OK;
        }
#endif //HAVE_STL
        if (strcmp(argv[1], "set-neighbor") == 0) {
#ifdef HAVE_STL
            if (nixnode_) {
                nixnode_>AddAdj(atol(argv[2]));
            }
#endif //HAVE_STL
            return(TCL_OK);
        }
        if (strcmp(argv[1], "addr") == 0) {
            address = Address::instance()<u>.str2addraddress);
            }
#endif //HAVE_STL
            return TCL_OK;
        }
        // End mods for Nix-Vector routing
    } else if (strcmp(argv[1], "nodeid") == 0) {
        nodeid = atoi(argv[2]);
        return TCL_OK;
    } else if (strcmp(argv[1], "addlinkhead") == 0) {
        LinkHead* slhp =
(LinkHead*)TclObject::lookup(argv[2]);
        if (slhp == 0)
            return TCL_ERROR;
        slhp->insertlink(&linklisthead);
        return TCL_OK;
    } else if (strcmp(argv[1], "addenergymodel") == 0) {
energy model = (EnergyModel*)TclObject::lookup(argv[2]);
        if(!energy model)
            return TCL_ERROR;
        return TCL_OK;
    } else if (strcmp(argv[1], "namattach") == 0) {
        int mode;
        namChan = Tcl_GetChannel(tcl.interp(),
(char*)argv[2],
                                &mode);
        if (namChan == 0) {
            tcl.resultf("node: can't attach %s",
argv[2]);
            return (TCL_ERROR);
        }
    }
}

```



```

        }
        return (TCL_OK);
    } else if (strcmp(argv[1], "add-neighbor") == 0) {
        Node * node = (Node *)TclObject::lookup(argv[2]);
        if (node == 0) {
            tcl.resultf("Invalid node %s", argv[2]);
            return (TCL_ERROR);
        }
        addNeighbor(node);
        return TCL_OK;
    }
}

return ParentNode::command(argc, argv);
}

void Node::route\_notify(RoutingModule *rtm) {
    if (rtnotif == NULL)
        rtnotif = rtm;
    else
        rtnotif -> route\_notify(rtm);
}

void Node::unreg\_route\_notify(RoutingModule *rtm) {
    if (rtnotif) {
        if (rtnotif == rtm) {
            //RoutingModule *tmp = rtnotif_;
            rtnotif = rtnotif -> next\_rtm;
            //free (tmp);
        }
        else
            rtnotif -> unreg\_route\_notify(rtm);
    }
}

void Node::add\_route(char *dst, NsObject *target) {
    if (rtnotif)
        rtnotif -> add\_route(dst, target);
}

void Node::delete\_route(char *dst, NsObject *nullagent) {
    if (rtnotif)
        rtnotif -> delete\_route(dst, nullagent);
}

void Node::set\_table\_size(int nn) {
    if (rtnotif)
        rtnotif -> set\_table\_size(nn);
}

void Node::set\_table\_size(int level, int csize) {
    if (rtnotif)
        rtnotif -> set\_table\_size(level, csize);
}

void Node::addNeighbor(Node * neighbor) {
    neighbor list node* nlistItem = (neighbor list node
*)malloc(sizeof(neighbor list node));
    nlistItem->nodeid = neighbor->nodeid();
    nlistItem->next = neighbor list;
}

```

```

        neighbor list = nlistItem;
    }

void Node::namlog(const char* fmt, ...)
    // Don't do anything if we don't have a log file.
    if (namChan == 0)
        return;
    va_list ap;
    va_start(ap, fmt);
    vsprintf(nwrk, fmt, ap);
    namdump();
}

void Node::namdump()
{
    int n = 0;
    /* Otherwise nwrk_ isn't initialized */
    n = strlen(nwrk);
    if (n >= NODE_NAMLOG_BUFSZ-1) {
        fprintf(stderr,
            "Node::namdump() exceeds buffer size. Bail
out.\n");
        abort();
    }
    if (n > 0) {
        /*
         * tack on a newline (temporarily) instead
         * of doing two writes
         */
        nwrk[n] = '\n';
        nwrk[n + 1] = 0;
        (void)Tcl_Write(namChan, nwrk, n + 1);
        nwrk[n] = 0;
    }
}

// Given an interface label for a NetworkInterface on this node, we return
// the head of that link
NsObject* Node::intf to target(int32_t label)
00306 {
    LinkHead *lhp = linklisthead.lh_first;
    for (; lhp; lhp = lhp->nextlinkhead())
        if (label == lhp->label())
            return ((NsObject*) lhp);
    return NULL;
}

// A class static method. Return the node instance from the static node
list
Node* Node::get_node_by_address (nsaddr_t id)
{
    Node * tnode = nodehead.lh_first;
    for (; tnode; tnode = tnode->nextnode()) {
        if (tnode->address == id) {
            return (tnode);
        }
    }
    return NULL;
}

```



# **Annexe C**

## Mesures faites avec les méthodes broadcast-broadcast, broadcast-unicast, unicast-broadcast, unicast-unicast.

### 1. Réalisation

Les mesures effectuées pour valider les différentes stratégies d'échanges présentées ont été réalisées dans les locaux de l'équipe Réseaux et Protocoles du LIMOS à l'IUT d'Aubière. Nous avons disposé de 5 ordinateurs équipés de cartes IEEE 802.11b au format PCMCIA de marque Belkin et au format PCI de marque Micronet. La mobilité n'étant pas déterminante pour cette série de mesures, les ordinateurs ont été utilisés en tant que postes fixes. Nous aurions souhaité pouvoir expérimenter nos différentes stratégies avec un nombre plus important de stations mais nos moyens matériels limités ne nous le permettaient pas.

Nous avons sélectionné la distribution Linux Redhat 8.0 comme système d'exploitation. Le pilote HostAP a été compilé puis installé pour gérer la carte réseau sans fil. HostAP publie les interfaces gérées sous le nom *wlanX* où *X* représente l'index de l'interface. La numérotation débute avec la valeur 0. Les interfaces Ethernet sont traditionnellement nommées *ethX*. Le paramétrage de l'interface *wlan0* est effectué à l'aide d'un fichier texte nommé *ifcfg-wlan0*, situé dans le répertoire */etc/sysconfig/networkscripts*.

Ce fichier permet de spécifier les paramètres nécessaires à l'exploitation de la carte par le protocole IP (adresse IP, masque, passerelle, ...) mais également tous les paramètres IEEE 802.11b spécifiques. Nous fixons ainsi le mode opératoire, l'identifiant de cellule (SSID), le numéro du canal et le débit. Le Tableau 1 présente l'utilisation et le paramétrage des différents matériels.

	Ordinateur 1		Ordinateurs 2,3,4 et 5			
Rôle	Point d'accès	Moniteur	Station			
Mode	Master	Monitor	Managed			
SSID	Cell0	MONO	Cell0			
Canal	10					
Débit	11 Mbits/sec					
Adresse IP	10.0.0.1	10.0.0.30	10.0.0.10	10.0.0.11	10.0.0.12	10.0.0.13

**Tableau 1 :Utilisation et paramétrage des matériels**

Pour des raisons de disponibilité matérielle, l'ordinateur 1 a été équipé de 2 cartes réseau pour jouer le rôle de point d'accès et de moniteur. Le paramétrage de notre dispositif a été vérifié à l'aide des commandes *iwconfig* et *ping*. L'outil *iwconfig*, qui fait partie des Wireless Tools, permet de lister les interfaces réseaux du système et d'afficher pour celles qui implémentent les Wireless Extensions, les informations spécifiques au sans fil. Nous pouvons donc vérifier

si nos paramètres ont été pris en compte et, pour les stations, si la procédure d'affiliation a été menée à terme. Nous avons contrôlé ensuite que le point d'accès était joignable et ce dans un délai correct.

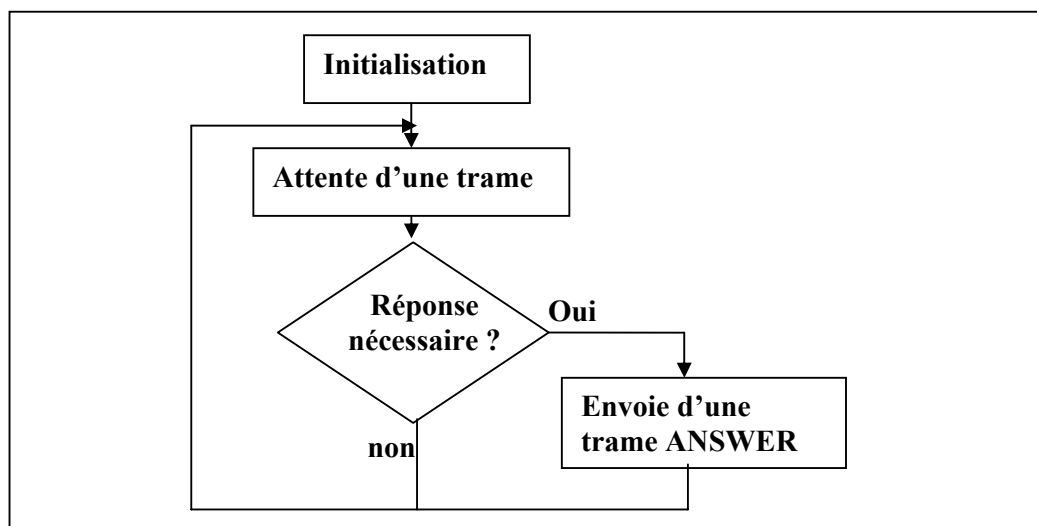
La fonction de monitoring est effectuée simultanément à l'aide d'Ethereal. Il est important de vérifier le bon fonctionnement du dispositif en vérifiant la présence de beacons.

Pendant l'initialisation et l'affiliation, le trafic de gestion peut également être monitoré. Enfin, la phase de contrôle permet de visionner le trafic ICMP généré par la commande *ping*.

Une fois les phases d'installation, de configuration et de vérification de notre dispositif terminées, nous avons installé puis compilé sur chacune des machines les applications spécialement développées pour les mesures. Nous avons implémenté nos échanges sous forme de trames UDP à l'aide de l'API socket. Les travaux, menés durant la phase de spécification des caractéristiques du simulateur WAVES, nous ont permis de fixer à 48 octets la taille des informations que chaque mobile doit publier pour la tâche de coopération 4

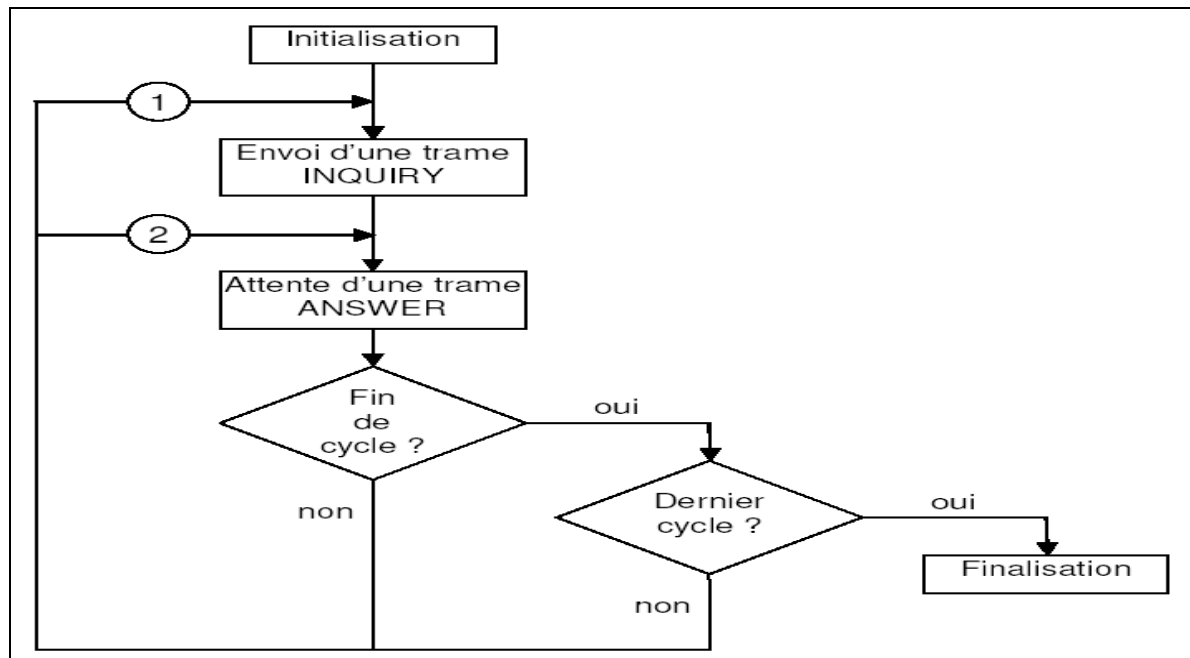
intracellulaire. Nous avons donc dimensionné les échanges à partir de cette valeur pour la phase de validation. Deux types de trames sont utilisés. Les trames INQUIRY sont les trames générées par le point d'accès pour interroger une station. Les trames ANSWER contiennent la réponse de la station.

La Figure 1 présente l'algorithme général du programme client utilisé par les stations.



**Figure 1 : Algorithme général du programme client**

Les paramètres à fournir sont directement fonction de la stratégie utilisée et du nombre de stations clientes impliquées dans les échanges. La Figure 2 présente l'algorithme général du programme serveur utilisé par le point d'accès.



**Figure 2 : Algorithme général du programme serveur**

Comme pour l'application cliente, les paramètres à fournir sont directement fonction de la stratégie utilisée et du nombre de clients impliqués dans les échanges. Un paramètre supplémentaire est introduit : le nombre de cycles d'échanges à réaliser. Une fois la totalité des cycles réalisés, l'application se termine. Deux variantes interviennent dans l'algorithme.

Les stratégies broadcast-unicast, unicast-broadcast et unicast-unicast nécessitent d'envoyer une trame au client pour provoquer une réponse. La branche numéro 1 de notre figure illustre ce principe. Au contraire, la stratégie broadcast-broadcast nécessite l'envoi d'une seule trame pour débiter un cycle comme l'indique la branche numéro 2.

Les mesures sont réalisées par Ethereal qui capture les trames échangées par les interfaces réseaux. Nous sauvegardons le résultat de cette capture dans un fichier binaire.

Nous avons donc réalisé une application nommée *analyze* qui permet d'extraire les principales caractéristiques des trames capturées et de sauvegarder ces informations dans un fichier au format texte. Le fichier exporté est en fait au format CSV (Comma Separated Value) ce qui présente l'avantage de pouvoir importer et traiter sans difficulté les données qu'il contient dans un tableur. Pour chaque trame capturée, nous extrayons son numéro, la datation en secondes, le type de trame 802.11 (trame de gestion, de données ou de contrôle), l'adresse MAC de l'émetteur, le protocole de niveau 3 (IP), le protocole de niveau 4 (UDP), la taille des données, ainsi qu'une information synthétique sur le type de trame (INQUIRY ou ANSWER) et la station concernée.

L'exploitation des informations collectées est réalisée à l'aide du tableur Microsoft Excel qui nous permet d'effectuer les calculs numériques et statistiques nécessaires, ainsi que la production du résultat final sous forme de tableaux et de graphiques.

Pour chacune des quatre stratégies, nous avons réalisé une série de mesures de 500 cycles avec successivement 1, 2, 3 et 4 stations clientes, en conservant la valeur par défaut du délai inter beacons, que nous noterons par la suite DIB, soit 102,4 millisecondes.

## 2. Résultats

### 2.1. Broadcast-broadcast

Le Tableau 2 présente un extrait de la capture réalisée avec une seule station cliente. L'adresse 00:30:BD:61:0A:5B est celle de la carte réseau qui équipe le point d'accès. Elle caractérise les trames émises par le point d'accès vers les stations de la cellule. Nous pouvons constater que c'est notamment l'adresse source des beacons émis et celle des trames diffusées.

Ordre	Datation	Type	Source	Information	Cycle
9	0,819643	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
10	0,820501	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query all stations	1
11	0,821906	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
12	0,822011	IEEE 802.11 Acknowledgement			
13	0,922190	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
14	0,923550	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Answer from station 1	
15	0,924487	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query all stations	2
16	0,925767	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
17	0,925872	IEEE 802.11 Acknowledgement			
18	1,024503	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
19	1,026240	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Answer from station 1	

**Tableau 2 : Capture Broadcast-broadcast avec une station**

Un cycle débute après l'émission d'une trame portant l'information « Query all stations » (trames 10 et 15). Cette émission est consécutive à la génération d'un beacon (trames 9 et 13).

Le délai qui sépare le beacon et la trame de début de cycle est court, 858

microsecondes pour le premier cycle, car cette tâche est réalisée par le firmware de la carte réseau. La station 1 répond à cette sollicitation par l'envoi d'une trame de réponse (trame 11). Cette trame est acquittée par le matériel dans un très court délai de 105 microsecondes. L'événement suivant est l'émission d'un nouveau beacon. Immédiatement après intervient la diffusion de la réponse de la station 1 avec cependant une modification de l'adresse source qui est maintenant l'adresse du point d'accès (trame 14). Par ailleurs, l'application serveur du

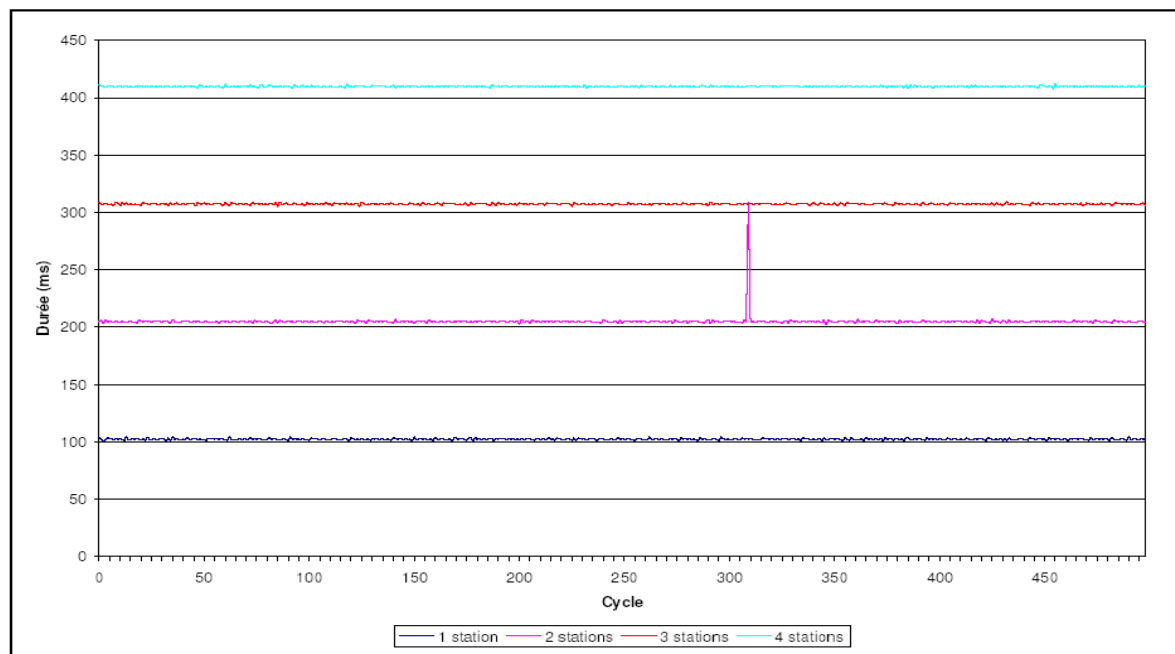


point d'accès a pris en compte la réponse de la station cliente dès sa réception, par conséquent une trame de début de cycle a été à nouveau générée (trame 15).

Le processus se répète jusqu'à la réalisation du nombre spécifié de 500 cycles. La durée d'un cycle est calculée comme l'écart entre sa date de début, émission de la trame « Query all stations », et celle du cycle suivant. Elle est exprimée en millisecondes.

Le comportement observé est bien celui attendu au vu de l'étude des spécifications du standard. La gestion de la diffusion est réellement pénalisante. Les différentes stations passent plus de temps en attente qu'en émission ou réception de données.

La figure 3 présente les durées de cycles obtenus par la stratégie Broadcast-broadcast pour 1, 2, 3 et 4 stations, pour une série de 500 cycles.



**Figure 3: Stratégie Broadcast-broadcast**

L'analyse du graphique nous permet de constater une grande stabilité de la valeur de durée de cycle. L'écart type, dispersion des valeurs autour de la moyenne, est assez faible. Nous pouvons également en déduire une forte corrélation entre la durée de cycle et le nombre de stations impliquées.

La durée du cycle pour  $n$  stations peut être estimée à l'aide de l'Équation suivante :

$$Durée = n * DIB$$

**Équation 1 : Durée de cycle en stratégie Broadcast-broadcast**

## 2.2. Broadcast-unicast

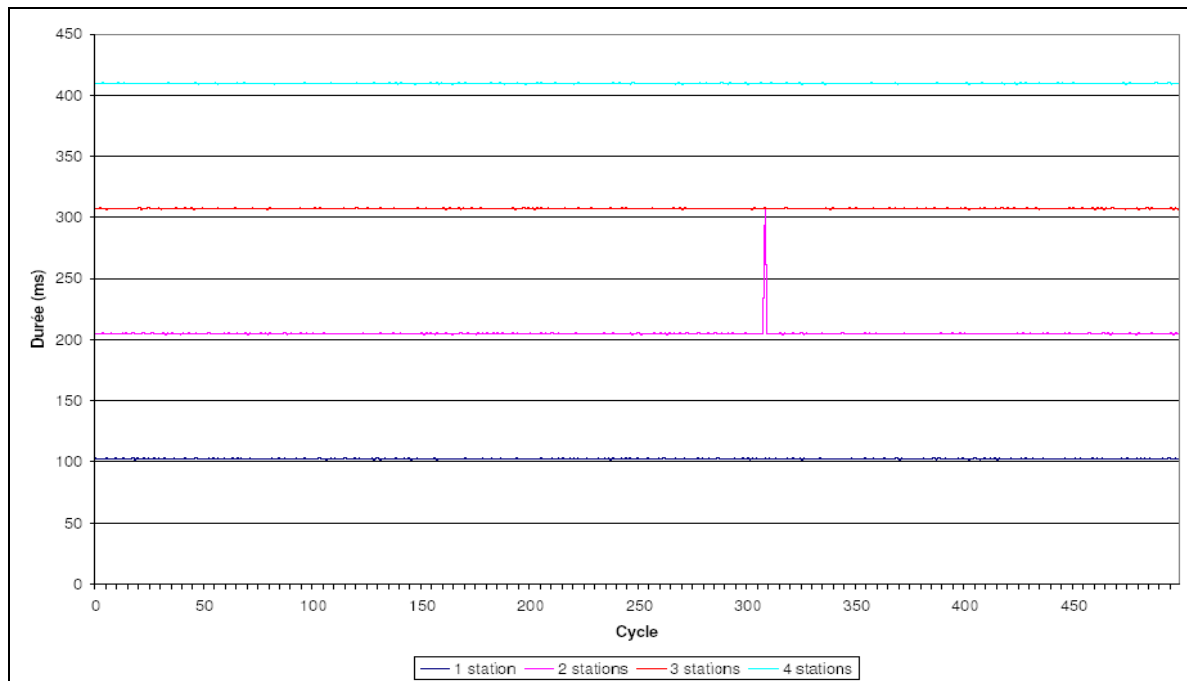
Le Tableau 3 présente un extrait de la capture réalisée avec une seule station cliente. Un échange de trames ARP nécessaire à la résolution d'adresses IP a été occulté, ce qui explique la discontinuité de la numérotation des trames.

Ordre	Datation	Type	Source	Information	Cycle
7	0,614463	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
8	0,616067	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	1
13	0,620182	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
14	0,620287	IEEE 802.11 Acknowledgement			
15	0,716887	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
17	0,718928	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	2
18	0,720219	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
19	0,720325	IEEE 802.11 Acknowledgement			

**Tableau 3 : Capture Broadcast-unicast avec une station**

Un cycle débute après l'émission d'une trame portant l'information « Query station 1 » (trames 8 et 17). Comme pour la première stratégie, cette émission est consécutive à la génération d'un beacon (trames 1 et 15). La station 1 répond à cette interrogation par l'envoi d'une trame de réponse (trame 13 et 18) acquittée par le matériel. Le point d'accès extrait de cette réponse les informations à diffuser dans la prochaine trame d'interrogation. Le processus se répète pour un nouveau cycle. Nous pouvons constater que là encore, le DIB a un grand impact sur les échanges et donc sur la durée du cycle, car encore une fois pendant l'intervalle entre deux beacons, une seule station peut être traitée.

La figure 4 présente les durées de cycles obtenus par la stratégie Broadcast-unicast pour 1, 2, 3 et 4 stations, pour une série de 500 cycles.



**Figure 4 : Stratégie Broadcast-unicast**

Le graphique présente des résultats similaires à ceux obtenus par la première stratégie.

#### 4.1.2.3. Unicast-broadcast

Le Tableau 4 présente un extrait de la capture réalisée avec une seule station cliente. Seules les trames significatives pour la compréhension du processus ont été conservées ce qui explique la discontinuité de la numérotation des trames.

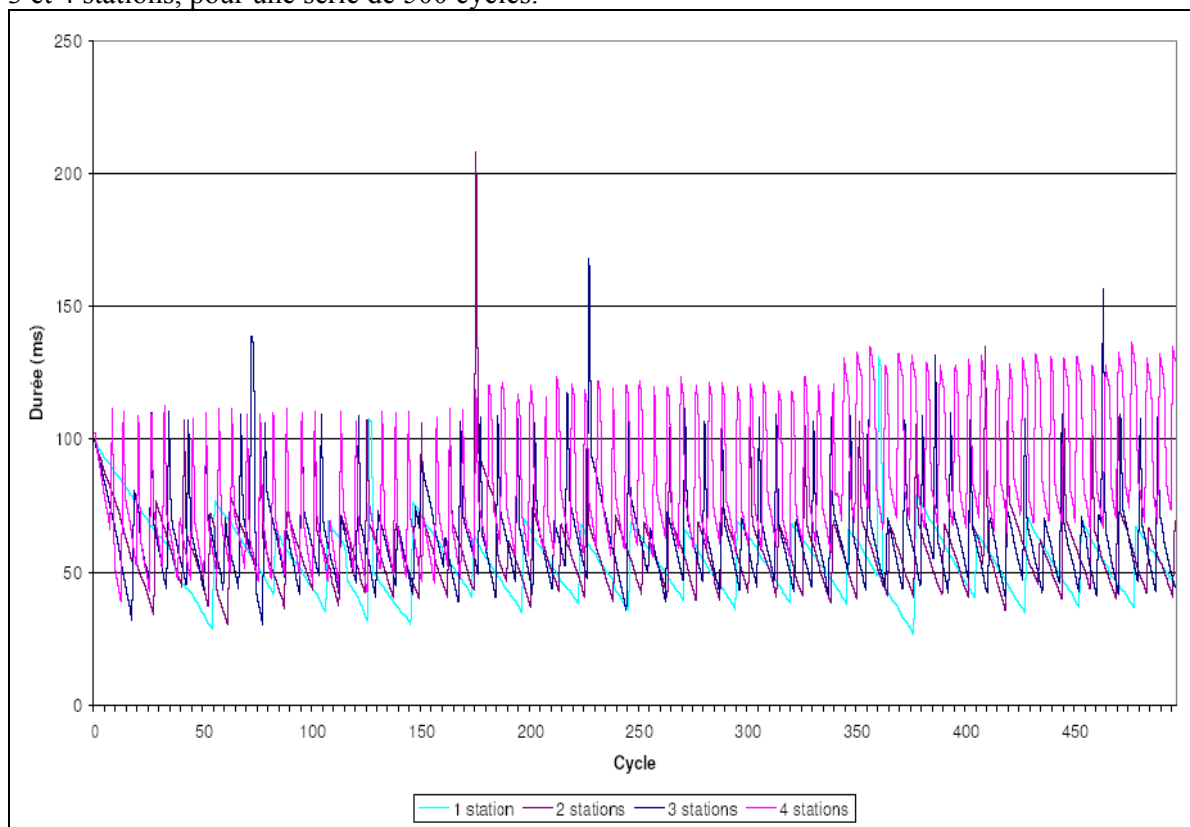
Ordre	Datation	Type	Source	Information	Cycle
14	0.925673	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	1
15	0.925941	IEEE 802.11 Acknowledgement			
16	0.927150	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
17	0.927255	IEEE 802.11 Acknowledgement			
162	1.021338	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	38
163	1.021606	IEEE 802.11 Acknowledgement			
164	1.022487	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
165	1.022592	IEEE 802.11 Acknowledgement			
166	1.024319	IEEE 802.11 Beacon frame	00:30:BD:61:0A:5B		
167	1.025904	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Answer from station 1	1
204	1.078074	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Answer from station 1	38
205	1.078446	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	39

**Tableau 4 : Capture Unicast-broadcast avec une station**

La première partie du tableau présente le début du premier cycle avec une trame adressée par le point d'accès à la station 1 (trame 14). La station répond par une trame de diffusion qui est

dans un premier temps communiquée au point d'accès, acquittée et mémorisée pour une réémission ultérieure (trame 16). Le cycle d'échange se poursuit dans la deuxième partie du tableau où nous pouvons constater que l'application serveur a traité 38 cycles (trame 162). Cependant, la fin de cycle intervient réellement quand les réponses des stations sont diffusées à l'ensemble de la cellule, car c'est seulement à ce moment que l'ensemble des stations en prend connaissance. L'émission du beacon (trame 166) provoque cette réémission (trames 167 à 204). Le processus se poursuit alors par le cycle 39 (trame 205). Le calcul de la durée du cycle est donc différent des deux premières stratégies expérimentées. Il s'agit ici de la différence entre la date d'émission de la trame d'interrogation de la première station et de la date de réémission de la réponse de la dernière station vers la cellule.

La figure 5 présente les durées de cycles obtenus par la stratégie Unicast-broadcast pour 1, 2, 3 et 4 stations, pour une série de 500 cycles.



**Figure 5 : Stratégie Unicast-broadcast**

#### 2.4. Unicast -unicast

Dans ce cas, les trames sont échangées en point à point avec une fiabilité des transmissions assurée par le matériel au moyen de l'acquiescement et de la réémission automatique. Les

beacons n'ont normalement pas d'impact au niveau du cadencement des échanges. Leur fonction est donc réduite à synchroniser les stations de la cellule.

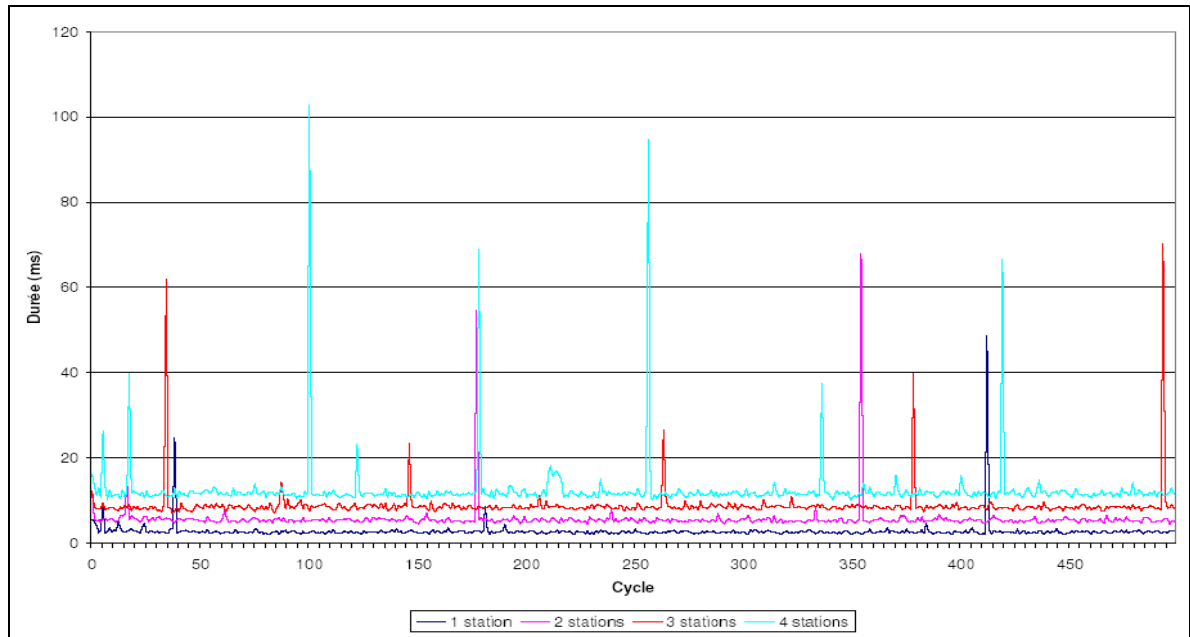
Le Tableau 5 présente un extrait de la capture réalisée avec une seule station cliente. Encore une fois, un échange de trames ARP nécessaire à la résolution d'adresses IP a été occulté, ce qui explique la discontinuité de la numérotation des trames.

Ordre	Datation	Type	Source	Information	Cycle
10	0,834684	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	1
11	0,834911	IEEE 802.11 Acknowledgement			
16	0,838896	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
17	0,839002	IEEE 802.11 Acknowledgement			
18	0,840289	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	2
19	0,840611	IEEE 802.11 Acknowledgement			
20	0,841531	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:59	Answer from station 1	
21	0,841636	IEEE 802.11 Acknowledgement			
22	0,845255	IEEE 802.11 Data	00:30:BD:61:0A:5B	Query station 1	3

**Tableau 5 : Capture Unicast-unicast avec une station**

Le cycle 1 débute par une trame d'interrogation (trame 10) émise par le point d'accès et acquittée par la station (trame 11). La station émet une trame de réponse (trame 16) acquittée également (trame 17). Le cycle 2 est alors initié. A nouveau, la durée du cycle est calculée comme l'écart entre sa date de début, émission de la trame « Query station 1 », et celle du cycle suivant. Elle est exprimée en millisecondes.

Le Graphique 6 présente les durées de cycles obtenus par la stratégie unicast-unicast pour 1, 2, 3 et 4 stations, pour une série de 500 cycles.



**Figure 6: Stratégie Unicast-unicast**

L'étude du graphique nous permet de constater que les performances de cette stratégie sont les meilleures que nous avons pu obtenir jusqu'à présent.

## Résumé

Ce travail a pour contexte des applications industrielles pour lesquelles des mobiles communiquent pour coopérer via un réseau local sans fil. La première étape a consisté à trouver le modèle de propagation le mieux adapté à une application industrielle générique que nous avons choisie. La deuxième étape a eu pour but de minimiser le temps nécessaire pour que l'ensemble des mobiles sous une même cellule d'un réseau 802.11b, puissent échanger les informations partagées dans le cadre de leur(s) coopération(s).

La sélection d'un modèle de propagation pertinent pour le site industriel choisi est basée sur une campagne de mesures. L'ajustement des paramètres des différents modèles existant a permis de retenir celui préconisé par l'ITU sous la référence Pr-1238 pour remplacer les modèles de base, non pertinents, proposés par l'outil de simulation NS2.

L'optimisation de la longueur du cycle des échanges entre mobiles a été réalisée selon deux axes : premièrement en agissant sur les façons de diffuser des informations à un groupe de mobiles sans être tributaire de l'envoi des *beacons* par le point d'accès, deuxièmement en modifiant l'aspect exponentiel binaire de l'algorithme de *Backoff* pour réduire le temps d'accès au médium radio.

Des simulations faites à partir de l'outil NS2 ont permis de montrer qu'une diffusion par classe (*broadcast*) réalisée par une émulation de la méthode PCF (couplée à un mécanisme de cache dans le point d'accès) donnait de meilleurs résultats que la méthode *Multiple-Unicast* quand le nombre de mobiles augmente. Dans le contexte de cette étude, la modification de l'évolution de la fenêtre de tirage au sort du *Backoff* apporte une amélioration du temps de transit des informations par rapport au *BEB* de la norme 802.11.

**Mots clé :** WLAN, IEEE802.11, CSMA/CA, BEB, Modèle de propagation.

## Abstract

The context of this work is industrial applications in which mobiles communicate to cooperate via a wireless LAN. Our first step consisted in finding the propagation model best suited to our industrial application. The purpose of the second step was to minimize the time necessary so that all mobiles within the same cell of a 802.11b network can exchange the information shared during their co-operation.

The selection of a relevant model of propagation for the selected industrial site is based on several measurements. By adjusting the parameters of the various models, we decided to select the model recommended by ITU under reference Pr-1238 as our model.

The optimization of the exchanges cycle length between mobiles was carried out according to two directions: firstly by acting on the way the information is disseminating by a group of mobiles without being dependent on the transmission of beacons by the access point, secondly by modifying the binary exponential aspect of the Backoff algorithm to reduce the access time to the radio medium.

The NS2 simulations show that a diffusion by class (broadcast) carried out by an emulation of the PCF method gave better results than the method Multiple-Unicast when the number of mobiles increases. In the context of this study, the modification of the evolution of the Backoff contention window reduces the time of information transit compared to the BEB of standard 802.11.

**Keywords :** WLAN, IEEE802.11, CSMA/CA, BEB, propagation model.